

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

“DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN
BINARIA Y CONTROL TOLERANTE A FALLAS EN SU ACTUADOR”

TESIS

Que para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Presenta:

MARIO HERAS CERVANTES

Directora de Tesis:

DRA. ELISA ESPINOSA JUÁREZ

CODIRECTORA: DRA. ADRIANA DEL CARMEN TÉLLEZ ANGUIANO



Morelia, Michoacán, México
Agosto de 2019





DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN BINARIA Y CONTROL TOLERANTE EN SU ACTUADOR

Los Miembros del Jurado de Examen de Grado aprueban la **Tesis de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, Opción en Sistemas de Control** de *Mario Heras Cervantes*.

Dr. Roberto Tapia Sánchez
Presidente del Jurado

Dra. Elisa Espinosa Juárez
Directora de Tesis

Dra. Adriana del Carmen Téllez Anguiano
Co-directora

Dr. Juan Anzures Marin
Vocal

Dr. Fernando Ornelas Tellez
Vocal

Dr. Roberto Tapia Sánchez
*Jefe de la División de Estudios de Posgrado
de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. UMSNH
(Por reconocimiento de firmas)*

– Dedicado a mi madre y a mi padre–
María Leticia – Mario Lázaro

A mis hermanos
— Cynthia, Mariana & Ricardo—

A Dios

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, especialmente a mi mamá por ser mi ejemplo de vida y todo su cariño, a mi papá por el apoyo incondicional, a mis hermanos Cynthia, Mariana y Ricardo por todo lo que hemos vivido juntos y porque siempre me han apoyado.

A mis asesores, Dra. Elisa Espinosa Juárez, Dr. Adriana del Carmen Téllez Anguiano y Dr. Juan Anzurez Marin, gracias por sus enseñanzas, apoyo y confianza para desarrollar este trabajo de tesis. A mis revisores, Dr. Fernando Ornelas Téllez y Dr. Roberto Tapía Sánchez, gracias por sus observaciones, correcciones disponibilidad y tiempo para enriquecer mi trabajo.

A mis amigos-profesores, a la Dra. Adriana gracias por su amistad, enseñanzas, consejos y regaños, sobre todo por su confianza y cariño, al Dr. Anzurez por brindarme su amistad y apoyo durante todo este tiempo, a la maestra Carmen gracias por sus consejos, regaños y palabras de aliento en todo momento, pero sobre todo por ser una segunda madre. Al Dr. Correa, gracias por su apoyo y confianza, gracias por ser mi amigo. A la Dra. Alma por toda su paciencia, apoyo y cariño, gracias por tantas agujas.

A Narciso, Adalid, Habraham, Jacobo, Ricardo, Alejandro, Juan Jesús, Marlem, Carlos, Gilberto y Baldwin por sus aportaciones y observaciones en el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos del posgrado Martín, Gil, Baldwin, Reynaldo, Víctor y América por su amistad y compañerismo. A mis grandes amigos y compañeros, David, Pocke, Tentory, Dulce, Richie, Gil, Gustavo, Oscar, gracias por su amistad y cariño. A Gerardo Marx por su amistad y enseñanzas, también por brindarme su plantilla y soporte en Latex.

Gracias a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, a la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica por brindarme la oportunidad de realizar este doctorado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), por el apoyo económico brindando en el desarrollo de este trabajo.

Finalmente gracias al Instituto Tecnológico de Morelia por brindarme sus instalaciones para realizar mis pruebas experimentales.

– Mario Heras Cervantes –

PUBLICACIONES

Revista:

- M. Heras Cervantes, A. d. C. Tellez Anguiano, J. Anzurez Marin, E. Espinosa Juarez, M. d. C. Garcia Ramirez and J. Correa Gomez, "Real-Time Simulation of a Luenberger Observer Applied to DC-DC Converters," in IEEE Latin America Transactions, vol. 16, no. 3, pp. 981-986, March 2018.

Capítulo de libro:

- A. del Carmen Téllez-Anguiano, M. Heras-Cervantes, J. Anzurez-Marín, G. Chávez-Campos, J. A. Gnecci, "Mathematical Modelling of Batch Distillation Columns: A Comparative Analysis of Non-Linear and Fuzzy Models," In Distillation-Innovative Applications and Modeling, IntechOpen, 2017.
- M. Heras-Cervantes, G. M. Chávez-Campos, H. J. Vergara-Hernández, A. del Carmen Téllez-Anguiano, J. Anzurez-Marin, J. E. Espinosa-Juárez, "Fuzzy Logic Modeling and Observers Applied to Estimate Compositions in Batch Distillation Columns," In Distillation-Modelling, Simulation and Optimization, IntechOpen, 2019.

Congreso internacional:

- M. H. Cervantes, M. F. Montiel, J. A. Marín, A. C. T. Anguiano and M. C. G. Ramírez, "Takagi-Sugeno fuzzy model for DC-DC converters," 2015 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, pp. 1-6, 2015.
- M. H. Cervantes, J. A. Marín, A. C. T. Anguiano, M. C. G. Ramírez and J. C. Gómez, "Residual generator based on a Luenberger observer applied to DC-DC converters," 2015 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, pp. 1-6, 2015.
- G. Orozco, B. Cortés, M. Heras, A. Téllez and J. Anzurez, "Analysis and comparison of distillation column models considering constant and variable relative volatility," 2016 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, pp. 1-6, 2016.
- M. Heras-Cervantes, J. Anzurez-Marin, A. d. C. Téllez-Anguiano, M. d. C. García-Ramírez and J. Correa-Gómez, "Modelling a heating-power actuator for a distillation column boiler," 2016 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, pp. 1-6, 2016.

- M. Heras-Cervantes, E. Espinosa-Juárez, J. Anzurez-Marín, S. Ramírez-Zavala and A. C. Téllez-Anguiano, “Analysis and Comparison of a Non-linear Model and a Model Based on Neural Networks to Estimate the Composition in a Distillation Column,” 2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, Mexico, pp. 1-5, 2018.
- M. Heras-Cervantes, J. Anzurez-Marín, E. Espinosa-Juárez, A. C. Téllez Anguiano and M. C. García-Ramírez, “Sliding Mode Fuzzy Observer for DC-DC Converters,” 2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, Mexico, pp. 1-6, 2018.
- J. J. Silva-Romero, A. d. C. Téllez-Anguiano, M. d. C. García-Ramírez, J. Castro-Urieta and M. Heras-Cervantes, “Monitoring Station based on Virtual Instrumentation applied to a Distillation Column,” 2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, Mexico, pp. 1-6, 2018.

Congreso estatal:

- M. Heras-Cervantes, A. del Carmen Téllez-Anguiano, M. de Carmen García-Ramírez, E. Espinosa-Juárez, J. Anzurez-Marín, “Modelado en espacio de estados de actuador para hervidor de columna de destilación”, 13 Congreso Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación, Michoacán, México, pp 1-6, 2018.
- M. Heras-Cervantes, E. Espinosa-Juárez, J. Anzurez-Marín, A. del Carmen Téllez-Anguiano, “Estimación de la concentración del componente ligero en un proceso de destilación utilizando observadores como sensores virtuales”, 13 Congreso Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación, Michoacán, México, pp 1-6, 2018.

ACRÓNIMOS

- **CD-CD:** Corriente Directa-Corriente Directa
- **D-LPV:** Descriptor-Linear Parameter Varying (Descriptor Lineal con Parámetros Variables en el tiempo)
- **FDD:** Fault Diagnosis and Detection (Diagnóstico y Detección de Fallas)
- **FDI:** Fault Detection and Isolation (Detección y Aislamiento de Fallas)
- **FTC:** Fault-Tolerant Control (Control Tolerante a Fallas)
- **KLD:** Kullback Leibler Divergence
- **LMI:** Linear Matrix Inequality (Desigualdades Matriciales Lineales)
- **LPG:** Liquefied Petroleum Gas (Gas Licuado del Petróleo)
- **MSB:** Model Switching or Blending (Conmutación de Modelos)
- **MRAC:** Model-Reference Adaptive Control (Control Adaptable por Modelo de Referencia)
- **NARMAX:** Auto-Regressive Moving Average with eXogenous inputs (No lineales Autoregresivos con Entrada Exógena y Media Móvil)
- **S-LPV:** Singular Linear Parameter Variant (Singular Lineal de Parámetros Variables)
- **STC:** Self-Tuning Control (Control Autosintonizable)
- **T-S:** Takagi-Sugeno

SIMBOLOGÍA

- A : Matriz de estados
- B : Vector de estados
- D : Producto destilado
- e : error de estimación
- H^{vap} : Entalpía de vapor
- h_i : Peso normalizado
- i : Corriente eléctrica
- J : Cantidad de calor
- k : Ganancia
- L : Concentración molar de líquido
- M_z : Conjunto difuso
- M_i : Masa retenida
- P_T : Presión total
- P^{sat} : Presión de saturación
- Q_p : Potencia calórica
- R : Resistencia
- r : Regla difusa
- R_f : Reflujo
- T_B : Temperatura de Ebullición
- t : Tiempo
- u : Entrada de control
- V : Concentración molar de vapor
- \dot{V} : Función de Lyapunov

- w : Peso de regla difusa
- \hat{x} : Estado estimado
- x_L : Concentración de líquido
- \hat{y} : Salida estimada
- y_v : Concentración de vapor
- α : Volatilidad relativa
- φ : Función deslizante
- γ : Coeficiente de actividad
- z : Variable difusa

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	II
Publicaciones	III
Acrónimos	V
Simbología	VI
Abstract	1
Resumen	3
1. Introducción	5
1.1. Introducción	5
1.2. Estado del Arte	6
1.2.1. Modelos de columnas de destilación	7
1.2.2. Observadores	9
1.2.3. Sistemas de detección de fallas	10
1.2.4. Control tolerante a fallas	11
1.3. Enfoque del proyecto	11
1.4. Motivación y justificación	12
1.5. Objetivos	13
1.5.1. Objetivo general	13

1.5.2. Objetivos particulares	13
1.6. Metodología	13
1.7. Aportaciones	15
1.8. Contenido de la tesis	16
2. Modelado de columna de destilación y actuador	17
2.1. Modelo no lineal de columna de destilación	19
2.1.1. Volatilidad relativa constante	22
2.1.2. Volatilidad relativa variable	24
2.1.3. Simulación y comparación de modelos	25
2.2. Caso de estudio: Planta piloto EDF-1000	29
2.2.1. Modelo en espacio de estados del caso de estudio	30
2.2.2. Modelo difuso Takagi-Sugeno de caso de estudio	31
2.3. Simulación del modelo Takagi-Sugeno de una columna de destilación	36
2.4. Esquema del actuador	37
2.4.1. Modelo en espacio de estados del convertidor Buck-Boost	40
2.4.2. Modelo no lineal de convertidor Buck-Boost	41
2.4.3. Modelo Takagi-Sugeno de convertidor Buck-Boost	42
2.5. Simulación del modelo Takagi-Sugeno del convertidor Buck-Boost	44
2.6. Conclusiones	46
3. Observadores	48
3.1. Observador difuso	49
3.2. Observador robusto a variación de parámetros	49
3.3. Observador difuso con modos deslizantes	51
3.4. Observadores para columna de destilación	53
3.4.1. Observador difuso para columna de destilación	53
3.4.2. Observador difuso con modos deslizantes para columna de destilación	55
3.4.3. Simulación del observador difuso para una columna de destilación	56

3.4.4.	Validación del observador difuso con modos deslizantes para columna de destilación en línea	58
3.5.	Observador difuso con modos deslizantes para actuador	62
3.5.1.	Simulación de observadores para actuador	64
3.6.	Conclusiones	68
4.	Control tolerante a fallas para columna de destilación	69
4.1.	Controlador por compensación distribuida paralelo	72
4.2.	Metodología de diseño de controlador y observador difuso basados en LMI's	74
4.3.	Esquema general de sistema de diagnóstico y detección de fallas para la columna de destilación EDF-1000 y control tolerante a fallas para su actuador	75
4.4.	Sistema de detección y aislamiento de fallas para sensores de temperatura	76
4.4.1.	Validación experimental del sistema FDI en planta piloto EDF-1000	77
4.5.	Sistema de detección y diagnóstico de fallas y control tolerante para el actuador	82
4.5.1.	Simulación del sistema FDD y control FTC para el actuador del hervidor	86
5.	Conclusiones y Trabajos Futuros	94
5.1.	Conclusiones	94
5.2.	Trabajos Futuros	95

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Esquema de control tolerante a fallas propuesto	14
2.1. Planta de destilación	18
2.2. Diagrama de instrumentos de planta piloto EDF-1000	19
2.3. Esquema de condensador	20
2.4. Esquema de un plato del cuerpo de la columna.	21
2.5. Esquema de hervidor.	21
2.6. Concentraciones en los platos del cuerpo de la columna de volatilidad constante $\alpha = 1.2$	26
2.7. Concentraciones en los platos del cuerpo de la columna de volatilidad variable.	27
2.8. Comparación de temperaturas calculadas y medidas en el condensador.	28
2.9. Comparación de temperaturas calculadas y medidas en el hervidor.	28
2.10. Planta piloto EDF-1000	29
2.11. Estimación de las concentraciones en los platos de la columna de destilación del modelo Takagi-Sugeno.	38
2.12. Estimación de las temperaturas en los platos de la columna de destilación del modelo Takagi-Sugeno.	38
2.13. Hervidor de 2 tanques	39
2.14. Esquema de actuador de potencia calórica	40
2.15. Diagrama a bloques de modelo difuso Takagi-Sugeno para convertidor CD-CD	44
2.16. Transitorio de corriente en el inductor i_L del modelo T-S del convertidor	45
2.17. Transitorio de voltaje en el capacitor v_C del modelo T-S del convertidor	46

2.18. Voltaje en el capacitor v_C con perturbaciones en el voltaje de entrada v_{in}	46
2.19. Corriente en el inductor i_L con perturbaciones en el voltaje de entrada v_{in}	47
3.1. Esquema general de observador de estados	49
3.2. Esquema a bloques del observador difuso para la columna de destilación EDF-1000.	54
3.3. Esquema a bloques del observador difuso con modos deslizantes para la columna de destilación EDF-1000.	56
3.4. Estimación de la concentración del componente ligero del observador difuso con condiciones iniciales distintas, $x(0) \neq \hat{x}(0)$	58
3.5. Estimación de la concentración con perturbación en el plato 6 del observador difuso	58
3.6. Estimación de la concentración con perturbación en los platos 4, 6 y 8 del observador difuso	59
3.7. Panel frontal de la implementación del observador difuso con modos deslizantes	60
3.8. Estimación de concentración del observador difuso con modos deslizantes para la columna EDF-1000	60
3.9. Estimación de temperatura del observador difuso con modos deslizantes para la columna EDF-1000	61
3.10. Estimación de temperatura del observador difuso con modos deslizantes con condiciones iniciales distintas, $\hat{T}_{11}(0) = 76.20^\circ C$, $T_{11}(0) = 76.41^\circ C$, $\hat{T}_{10}(0) = 74.57^\circ C$, $T_{10}(0) = 74.46^\circ C$	62
3.11. Estimación de temperatura del observador difuso con modos deslizantes para la columna EDF-1000 con perturbación en la medición de temperatura en el plato 11 (T_{11})	62
3.12. Estimación de temperatura del observador difuso con modos deslizantes para la columna EDF-1000	63
3.13. Observador difuso con modos deslizantes para convertidor CD-CD	64
3.14. Transitorio de voltaje en v_C con condiciones distintas, $v_C(0) = 0$ V y $\dot{v}_C(0) = -250$ V	65
3.15. Transitorio de corriente en el inductor con condiciones iniciales distintas, ($i_L(0) = 0$ A, $\dot{v}_C(0) = 20$ A)	65
3.16. Respuesta del observador en el voltaje del v_C con perturbaciones en el voltaje de alimentación V_{in}	66
3.17. Respuesta del observador en la corriente del inductor i_L con perturbaciones en el voltaje de alimentación V_{in}	66
3.18. Respuesta del observador en el voltaje del v_C con variaciones en la carga R	67
3.19. Respuesta del observador en la corriente del inductor i_L con variaciones en carga R	67

4.1. Esquema a bloques de las etapas de un sistema FDI	73
4.2. Esquema de detección y aislamiento de fallas en sensores de columna de destilación y control tolerante a fallas para el actuador	75
4.3. Esquema de detección y aislamiento de fallas en sensores de columna de destilación. . .	77
4.4. Ventanas de la estación de monitoreo en LabVIEW	79
4.5. Sistema FDI: descalibración de sensor	80
4.6. Sistema FDI: falla de sensor	81
4.7. Sistema FDI: falla de sensor y de descalibración simultánea	83
4.8. Sistema FDI: fallas múltiples	84
4.9. Esquema de diagnóstico y detección de fallas y control tolerante a fallas para el actuador	85
4.10. Dinámica de los observadores y modelo no lineal con perturbaciones en el voltaje de alimentación.	88
4.11. Residuos generados por observadores por perturbaciones en voltaje de alimentación. . .	88
4.12. Síntomas obtenidos por los residuos generados con perturbaciones en el voltaje de alimentación.	89
4.13. Ajuste de ciclo de servicio d ante fallas abruptas de voltaje de alimentación.	89
4.14. Dinámica de los observadores y modelo no lineal con perturbaciones en la carga.	90
4.15. Residuos generados por observadores por perturbaciones en la carga.	90
4.16. Síntomas obtenidos por los residuos generados con perturbaciones en el voltaje de alimentación.	91
4.17. Ajuste de ciclo de servicio d ante fallas en la carga.	91
4.18. Dinámica de los observadores y del modelo no lineal con perturbaciones mixtas y simultáneas.	92
4.19. Residuos generados por observadores por perturbaciones mixtas y simultáneas.	92
4.20. Síntomas obtenidos por los residuos generados con perturbaciones mixtas y simultáneas.	93
4.21. Ajuste de ciclo de servicio d ante fallas mixtas y simultáneas	93

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Parámetros termodinámicos de los componentes de la mezcla Etanol-Agua.	25
2.2. Parámetros iniciales de la mezcla Etanol-Agua.	25
2.3. Parámetros de las entradas para la columna de destilación.	26
2.4. Parámetros iniciales de la mezcla binaria.	37
2.5. Parámetros de entrada	37
2.6. Parámetros de operación de convertidor Buck-Boost.	45
3.1. Parámetros de la mezcla para validación del observador difuso	57
3.2. Parámetros de los componentes de la mezcla para la validación del observador difuso . .	57
3.3. Características de las entradas del proceso para validación de observador difuso	57
3.4. Parámetros de la mezcla para validación del observador difuso con modos deslizantes . .	59
3.5. Parámetros de los componentes de la mezcla para la validación del observador difuso con modos deslizantes	59
3.6. Características de las entradas del proceso para validación de observador difuso	60
3.7. Parámetros del convertidor Buck-Boost	64
4.1. Matriz de fallas de sistema FDI	78
4.2. Matriz de fallas de sistema FDD	85
4.3. Secuencia de fallas abruptas en el voltaje nominal	87
4.4. Secuencia de fallas en carga	88
4.5. Secuencia de fallas en carga	90

ABSTRACT

A Fault Tolerant Control (FTC) scheme applied to a distillation column is presented, with the objective of improving the safety of the process and the quality of the distilled product. The fault-tolerant control scheme is composed of a fault detection and isolation system (FDI) in the temperature sensors of the distillation column, a fault detection and diagnosis system (FDD) in the actuator. The fault tolerance is applied to the boiler of the distillation column, which is a Buck-Boost converter that regulates the voltage of the heating resistance.

The FDI system is based on a fuzzy observer with sliding modes as a residual generator to determine and locate the sensor faults. The fuzzy observer with sliding modes estimates the concentrations of the light component and the temperatures in each plate of the distillation column. The Takagi-Sugeno fuzzy model have eight rules considering the concentration of the condenser and the boiler as variable premises, as well as the reflux action. Submodels are obtained by non-linear sectors, taking maximum and minimum experimental parameters. For the correction stage, the gains and stability of the observer are determined by the solution of linear matrix inequalities (LMI's).

The FDD system is based on a bank of two fuzzy observers with sliding modes as residual generators to diagnose the fault. Observers have the same structure but different reference input. They estimate the output voltage and current in the inductor and take as a reference a single measurement for the correction stage in order to generate residual to diagnose the fault. The observer is based on a Takagi-Sugeno fuzzy model of four fuzzy rules taking as premises the voltage in the capacitor and the current in the inductor. The observer's gains and stability are determined by the LMI's solution.

The parallel distributed compensation is used to adjust the duty cycle of the converter using the fuzzy observer design as well as the solution of the LMI system to determine the controller's gains.

The validation of each stage modeling, observers, FDI system, FDD and FTC is done by simulation with real data from the distillation column and the actuator. The FDI system and the fuzzy observer with sliding modes for the distillation column are validated on-line in the process using an EDF-1000 distillation pilot plant.

Keywords: Fault tolerant control, Fault detection and isolation, Fault detection and diagnostics, Fuzzy observer with sliding modes, Takagi-Sugeno, Linear Matrix Inequality, Parallel Distributed Compensation, Distillation column, DC-DC Converter.

RESUMEN

En este trabajo de tesis se propone un esquema de Control Tolerante a Fallas (FTC, por sus siglas en inglés) aplicado a una columna de destilación, con la finalidad de mejorar la seguridad del proceso y la calidad del producto destilado. El esquema de control tolerante a fallas está compuesto por un sistema de detección y aislamiento de fallas (FDI, por sus siglas en inglés) en los sensores de temperatura de la columna de destilación y un sistema de detección y diagnósticos de fallas (FDD) en el actuador. La tolerancia a fallas es aplicada al actuador para el hervidor de la columna de destilación, que es un convertidor CD-CD tipo Buck-Boost para regular el voltaje aplicado a la resistencia calefactora de la columna de destilación.

El sistema FDI se basa en un observador difuso con modos deslizantes como generador de residuos para determinar y localizar la falla. El observador difuso con modos deslizantes estima las concentraciones del componente ligero y las temperaturas en cada plato de la columna de destilación. La etapa de estimación del observador es un modelo difuso Takagi-Sugeno de ocho reglas tomando como variables premisas a la concentración del condensador y del hervidor, así como la acción de reflujo. Los submodelos se obtienen mediante sector no lineal, tomando parámetros máximos y mínimos experimentales. Para la etapa de corrección, las ganancias y la estabilidad del observador se determinan mediante la solución de desigualdades lineales matriciales (LMI's, por sus siglas en inglés).

El sistema FDD se basa en un banco de dos observadores difusos con modos deslizantes como generadores de residuos para diagnosticar la falla. Los observadores tienen la misma estructura pero diferente entrada de referencia; estiman el voltaje de salida y la corriente en el inductor y toman como referencia una sola medición para la etapa de corrección con la finalidad de generar residuos para diagnosticar la falla. El observador se basa en un modelo difuso Takagi-Sugeno de cuatro reglas difusas tomando como variables premisas al voltaje en el capacitor y la corriente en el inductor. Las ganancias del observador y la estabilidad se determinan mediante la solución de LMI's.

La acción de control se realiza por compensación distribuida paralela para ajustar el ciclo de servicio del convertidor utilizando el diseño del observador difuso así como

la solución del sistema de LMI's para determinar las ganancias del controlador.

La validación de cada etapa de modelado, observadores, sistema FDI, FDD y FTC se realiza mediante simulación con datos reales de la columna de destilación y del actuador. El sistema FDI y el observador difuso con modos deslizantes para la columna de destilación se validan en un proceso en línea mediante una planta piloto de destilación EDF-1000.

Palabras clave: Control tolerante a fallas, sistema de detección y aislamiento de fallas, sistema de detección y diagnóstico de fallas, observador difuso con modos deslizantes, Takagi-Sugeno, desigualdades lineales matriciales, compensación distribuida paralela, columna de destilación, convertidor CD-CD.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La dependencia de la sociedad moderna en los sistemas y procesos tecnológicos se ha incrementado en los últimos años, por lo tanto se ha convertido en una necesidad su buen funcionamiento. Por otra parte, los sistemas y procesos industriales son cada día más sofisticados debido al número de componentes que los conforman y de funciones que implementan, sin embargo, esto incrementa la vulnerabilidad de estos sistemas ante fallas. En términos generales, una falla es una variación no deseada en el comportamiento normal de sistema, provocando desperfectos en el equipo y riesgos para el operador, así como productos con características no deseadas del proceso.

La gran mayoría de los sistemas de control no contemplan factores como mal funcionamiento de sensores, actuadores u otros componentes que provocan un comportamiento no deseado del sistema, inestabilidad o riesgos para los usuarios. Por lo anterior, los procesos industriales tienen la necesidad de implementar dispositivos de retroalimentación y automatización que permitan un mejor desempeño y una mayor seguridad para el proceso y para el usuario.

En los últimos años se ha planteado el diseño de sistemas de control con el propósito de tolerar fallas y mantener las propiedades de estabilidad y desempeño deseado. Una detección de fallas confiable, oportuna y eficiente puede prevenir riesgos tanto para el proceso como para el usuario, por lo que las técnicas de control y detección de fallas en sistemas industriales se han convertido en indispensables.

Los sistemas que cuentan con un esquema de control tolerante a fallas son sistemas con la capacidad de continuar operando incluso ante la presencia de fallas en sensores o

actuadores [Patton, 2015]. Los sistemas de control tolerante a fallas (FTC), son sistemas de control que tienen la característica de mantener la estabilidad y un desempeño adecuado o necesario del sistema durante la presencia de anomalías [Blanke et al., 2010]. También son conocidos como sistemas de auto recuperación. El control tolerante a fallas es una combinación de tres campos de investigación; identificación y detección de fallas, control robusto y control reconfigurable.

A nivel industrial, existen diversos procesos que requieren de un sistema FTC para operar adecuadamente; en la industria química la destilación es un proceso que puede beneficiarse con estos sistemas ya que requieren gran cantidad de energía para realizar el calentamiento de la mezcla, por lo que el mal funcionamiento de algún componente que lo conforma, poniendo en riesgo la seguridad de los operadores o la calidad del producto, de ahí la necesidad de implementar técnicas de control y monitoreo constante para evitar fallas en el proceso.

1.2 Estado del Arte

El esquema de automatización general para una columna de destilación consta de sensores de temperatura y concentración en los platos, condensador y hervidor de dicha columna; actuadores, tales como válvulas para el reflujo, extracción de destilado y producto de fondo, así como para regular y controlar la potencia calórica en el proceso [Nakaiwa et al., 1997].

Un proceso controlado de calentamiento de baja temperatura tiene diversas ventajas en procesos de destilación. Esto es fácil de ver si se considera una columna adiabática, cuyo balance térmico consiste en la igualdad entre la suma de la cantidad de energía que entra más la cantidad de calor intercambiado en el hervidor [da Silva et al., 2015]. Otra opción de mejora son las columnas de destilación con integración de calor (HIDiCs), las cuales necesitan la transferencia de calor entre las dos secciones de columna, enriquecimiento y empobrecimiento, favoreciendo la reversibilidad del proceso de separación y conduciendo al aumento de las cargas de calor para las dos secciones, pero la transferencia de calor para cubrir la carga de calor es costosa y genera grandes dificultades en el diseño [Xu et al., 2013].

Una opción ampliamente usada para reducir el consumo de energía es mediante un control adecuado de los actuadores del proceso. Un actuador es un sistema capaz de transformar energía hidráulica, mecánica o eléctrica en otro tipo de energía para la activación de un proceso automatizado y se manipula un regulador o un controlador para realizar dicha acción.

Los actuadores en una columna de destilación tienen un papel muy importante, debido a que pueden modificar variables físicas del proceso como temperatura y presión [Paraschiv and Olteanu, 2015], la pureza del producto a partir del reflujo la velocidad de la destilación [Shafeeq et al., 2010].

El generar de manera inadecuada el intercambio de calor entre hervidor y mezcla en el proceso de destilación puede ocasionar variaciones de temperaturas, calentamiento no uniforme en la mezcla, choques térmicos en los platos, entre otros daños, por lo tanto diseñar técnicas de modelado y control son tarea constante en la investigación para evitar riesgos para el usuario, daños en el equipo y mala calidad del producto destilado [Paraschiv and Olteanu, 2015].

En la literatura se encuentran técnicas de modelado y control aplicadas a columnas de destilación con diferentes objetivos y metodologías como, estimadores, observadores, sistemas de detección de fallas, sistemas de control, entre otras, con la finalidad de un mejor análisis, mejorar la calidad del producto, la velocidad de operación, la seguridad del usuario, entre otras.

1.2.1 Modelos de columnas de destilación

A lo largo de los años, en la literatura se han reportado diferentes modelos matemáticos con la finalidad de mejorar la comprensión dinámica de las columnas de destilación. Los modelos lineales y no lineales pueden ser modelos simples donde la cantidad de variables son pocas y las ecuaciones son de bajo orden, facilitando el diseño e implementación de controladores, así como el uso de herramientas computacionales.

Skogestad en [Skogestad, 1997] presenta un modelo simplificado de una columna de destilación basándose en el equilibrio líquido-vapor para una mezcla binaria, donde modela todos los elementos de la columna como platos del cuerpo de la columna por igual. El modelo de Cingara y Jovanovic [Cingara et al., 1990] se basa en la existencia de flujos molares de líquido y vapor, internos y externos, que varían en cada plato. Las composiciones del producto de fondo y del producto destilado se estiman usando el modelo dinámico basado en los balances de materia y componente. Los autores en [Kienle, 2000] presentan un modelo de bajo orden de una destilación multicomponente ideal utilizando la teoría de propagación de ondas no lineales. De la misma forma, los autores en [Balasubramhanya and Doyle Iii, 2000] presentan un modelo de bajo orden para una columna de destilación multicomponente reactiva, además diseñan un control predictivo (MPC) para obtener la mejor calidad del producto destilado.

Los modelos rigurosos, son modelos más completos debido a que representan de manera más específica nivel por nivel o plato por plato el modelo de una columna de destilación a partir del equilibrio de fases en cada elemento de la columna de destilación (hervidor, condensador, plato). En estos modelos las expresiones matemáticas están determinadas por una serie de ecuaciones diferenciales dadas por los balances de masa, del componente ligero o de energía que son dependientes de la aplicación, de la estrategia de control o del tipo de operación. La ventaja importante que se tiene con este tipo de modelado es la alta resolución de la dinámica, pero tiene la desventaja de conjuntar un mayor número de variables y expresiones que dificultan tanto el diseño e implementación de controladores como la simulación.

En [Osuolale and Zhang, 2016] se presenta un modelo basado en redes neuronales con el objetivo de optimizar la eficiencia de energía en una columna de destilación binaria. Los autores en [Lopez-Saucedo et al., 2016] presentan la simulación y optimización de un modelado riguroso de una columna de destilación reactiva tipo batch convencional y no convencional. La representación o identificación paramétrica es otra metodología para estimar ciertas variables de las columnas de destilación como se presenta en [Zhu, 1999] y [Safdarnejad et al., 2016].

Unas de las ventajas del diseño de técnicas de control no lineales es la complejidad en la implementación, las estrategias de modelo utilizando lógica difusa facilitan la implementación de técnicas de control enfocándose al entendimiento intuitivo de cómo mejorar el proceso de control. El modelado difuso Takagi-Sugeno es una herramienta para el modelado y control de sistemas complejos utilizando el concepto de descomposición de un sistema no lineal en una estructura multi-modelos compuesta por modelos lineales y no necesariamente independientes y de lógica difusa [Johanson and Murray-Smith, 1997]-[Angelov and Filev, 2004], donde la representación del sistema no lineal se logra mediante una sumatoria ponderada de todos los subsistemas. La representación difusa Takagi-Sugeno provee una solución para resolver la problemática en el diseño e implementación de estrategias de control para sistemas no lineales, como en [Wang et al., 1995], donde los autores proponen una metodología para diseñar técnicas de control para sistemas representados de la forma Takagi-Sugeno. Debido a la estrecha relación entre la representación difusa de sistemas no lineales y la teoría de desigualdades matriciales lineales se han desarrollado trabajos basados simultáneamente en ambas técnicas, ya que permiten encontrar soluciones a los cálculos correspondientes a ganancias de controladores, ganancias de observadores y análisis de estabilidad de Lyapunov [Tanaka and Sugeno, 1992].

Los autores [Hernández, 2018][Hernández, 2017] presentan el diseño y simulación de un modelo Takagi-Sugeno de una columna de destilación binaria tomando como variables difusas a la concentración del componente ligero en el condensador y en el hervidor además de la apertura de la válvula de reflujo. En [Hernández, 2018] se toman variables acotadas de acuerdo a las características reales del proceso además de utilizar funciones de membresíarapezoidales obteniendo resultados con mayor resolución en de la dinámica de una columna de destilación de 11 platos para una mezcla Etanol-Agua.

En la gran mayoría de modelados matemáticos de sistemas no lineales existe una diferencia entre los valores estimados y reales, que pueden ser por consideraciones ideales dentro de la descripción de la dinámica, pérdida de información en operaciones complejas, retraso de tiempo o inclusive una incorrecta medición de variables reales, de ahí la importancia de diseñar e implementar estrategias de control para corregir el cálculo, como lo son los observadores de estado.

1.2.2 Observadores

Entre los trabajos más importantes de observadores se encuentra [Lopez et al., 2015], donde los autores presentan un observador en tiempo discreto del tipo descriptor lineal con parámetros variables en el tiempo (D-LPV, por sus siglas en inglés) como estimador de estados y estimador de fallas para sensores y actuadores, utilizando el enfoque de H_∞ aplicado al error de estimación. El observador es validado en simulación con datos reales de un proceso en una columna de destilación.

Los autores en [Astorga et al., 2006] y [Cervantes et al., 2015a] presentan observadores del alta ganancia para estimar la concentración del componente ligero en una columna de destilación continua utilizando un conjunto de modelos para cada plato de la columna. Los autores en [Heras-Cervantes et al., 2013] presentan una comparación de observadores de alta ganancia para estimar temperaturas y concentraciones en cada plato y están basados en un modelo no lineal de una columna de destilación con alimentación continua. En [Hammouri et al., 2002] se presenta el diseño de un observador de alta ganancia para sistemas con estructura triangular. También se presenta una metodología para el cálculo de la ganancia del observador. Como caso de estudio se tiene a una columna de destilación y se valida mediante simulación. En [Téllez Anguiano et al., 2009] se presenta la validación experimental del observador de alta ganancia constante para la estimación de la concentración del componente ligero de la mezcla Etanol-Agua. La ventaja que presenta es el cálculo de la ganancia constante a partir de pocos parámetros de las desigualdades algebraicas de Ricatti. En [Téllez-Anguiano et al., 2012] se presenta la versión continuo-discreta del observador de alta ganancia constante aplicado también en una columna de destilación.

En [Quintero-Marmol et al., 1991], los autores presentan un par de observadores Luenberger extendido (orden completo y orden reducido) para estimar las concentraciones de una mezcla multicomponente a partir de mediciones de temperaturas de los platos de una columna de destilación. Las ganancias de los observadores son calculadas a partir de la ubicación de los eigenvalores a lazo cerrado utilizando un software matemático. Los resultados presentados son simulaciones para demostrar su desempeño. La problemática presentada es debida a la voltalidad relativa y a las condiciones iniciales del observador.

En [Lang and Gilles, 1990] se presenta un observador no lineal de orden completo para estimar las concentraciones y temperaturas de una columna de destilación. El modelo utilizado, es un modelo no lineal obtenido por el balance de materia en cada plato de la columna, dando como resultado un conjunto de ecuaciones diferenciales de alto orden y con términos no lineales. El observador es validado mediante simulación para mostrar su comportamiento y su robustez.

En el trabajo [Hernández, 2017] se presenta un observador difuso para una columna de destilación binaria que estima la concentración del componente ligero de una mezcla Etanol-Agua tomando como referencias a la concentración en todos los platos. En

[Hernández, 2018] se presenta también un observador difuso pero se compara con un observador difuso con modos deslizantes tomando como superficie deslizante al error de estimación que resulta de todas las concentraciones de la columna.

De las aplicaciones más importantes de los observadores son los generadores de residuos en los sistemas de detección y aislamiento de fallas [Frank and Ding, 1997] [Edwards et al., 2012] [Edwards et al., 2000], permitiendo generar la información necesaria para determinar si existe una falla o no.

1.2.3 Sistemas de detección de fallas

Los sistemas de detección y aislamiento de fallas (FDI) son estrategias fundamentales para el diseño e implementación de sistemas de control tolerante a fallas que garanticen la seguridad y fiabilidad de los sistemas y procesos ante fallas en sensores y actuadores.

En [Li and Olson, 1991] se presenta un sistema de detección y aislamiento de fallas para sistemas con estados afines. La estimación de estados se realiza por un observador del tipo Filtro Kalman. La generación de residuos se realiza mediante la teoría geométrica para sistemas lineales. El sistema FDI es validado para un reactor químico y una columna de destilación.

Los autores en [Manssouri et al., 2008] presentan una nueva metodología para detectar fallas en una columna de destilación utilizando redes neuronales, con la finalidad de mejorar la seguridad del proceso y reducir el número de accidentes. La aportación principal del trabajo es mostrar el desempeño de las redes neuronales para separar y distinguir las fallas. Para la validación se realiza una simulación con datos de un proceso de una columna de destilación continua para una mezcla binaria.

El trabajo presentado en [Yinghua et al., 2002] plantea detectar y diagnosticar fallas con base en el análisis de datos del componente principal en un proceso continuo multivariable para evitar los modelados rigurosos de los sistemas y los complejos algoritmos para la detección. El sistema FDI es aplicado para supervisar un proceso de destilación fraccionada de gases licuados.

En [García-Morales et al., 2015] se presenta un sistema de detección de fallas basado en un banco de observadores por modos deslizantes del tipo Super-Twisting. El sistema FDI es aplicado a un intercambiador de calor, permitiendo estimar fallas múltiples y simultáneas en sensores de entrada y salida del sistema.

El sistema de detección de fallas presentado en [Torres et al., 2013] se basa en observadores no lineales adaptables para una planta piloto de destilación, con la capacidad de determinar la magnitud, instante de aparición y magnitud de la falla en los sensores de temperatura con el uso de un solo observador. El sistema FDI es validado con datos de un proceso real.

Los autores en [Aggoune et al., 2016] presentan un sistema de detección de fallas aplicado a una columna de destilación utilizando la técnica black-box modeling basado en modelos no lineales autoregresivos con entrada exógena y media móvil (NARMAX, por sus siglas en inglés), en el modelado de la columna de destilación y divergencia Kullback Leibler (KLD, por sus siglas en inglés) para la detección de fallas. El sistema FDI es validado en una planta piloto de destilación.

1.2.4 Control tolerante a fallas

En la literatura existen pocos trabajos referidos a control tolerante a fallas aplicado a columnas de destilación en sensores y actuadores [Lawal and Zhang, 2015]; debido entre otras razones a la complejidad del sistema y a la dificultad de acceso al hardware.

En [Lawal and Zhang, 2015] se presenta un esquema de control tolerante a fallas aplicado a columnas de destilación binarias. El FTC está dividido en dos niveles detección de falla y reconfiguración de control. El primer nivel utiliza el análisis del principal componente (PCA) para detectar la falla y utilizan las gráficas para el aislamiento de la falla. De acuerdo a la información del sistema FDI el controlador es reconfigurado dependiendo de la ubicación de la falla.

Los autores en [Ortiz-Torres et al., 2016] presentan la simulación de un control tolerante a fallas aplicado a una columna de destilación con la finalidad de mantener en operación al proceso con y sin presencia de falla. El sistema FDI está compuesto por un banco de observadores de alta ganancia constante para estimar la concentración no medida en cada plato. Además utilizan 3 observadores adaptables para estimar la presión de vapor y parámetros de los actuadores. El control tolerante a fallas se reconfigura de acuerdo al elemento que falla.

En [González, 2012] se presenta un esquema de control tolerante a fallas para una clase de sistemas singulares lineales de parámetros variables (LPV, por sus siglas en inglés) politópicos usando observadores PI-Adaptables con el fin de mantener el buen desempeño del sistema.

De la revisión del estado del arte resulta evidente el interés que existe en mejorar la seguridad y confiabilidad de procesos industriales, en particular el proceso de destilación que requieren de un modelado y sistemas de control adecuados.

1.3 Enfoque del proyecto

Con la finalidad de diseñar el diagnóstico de fallas en una columna de destilación y el control tolerante a fallas en el actuador se plantea enfocarse en las siguientes técnicas:

Abordar el modelado del sistema es parte fundamental para el diseño de sistemas de

control tolerante; algunos sistemas son difíciles de modelar debido a las no linealidades de su dinámica, lo que hace difícil el diseño de estrategias de diagnóstico, detección y localización de fallas. La linealización de sistemas no lineales es una herramienta útil para enfrentar dicha problemática, facilitando la tarea de detectar fallas utilizando métodos de análisis lineal. Sin embargo, el modelo lineal puede representar con precisión la dinámica de un sistema no lineal para ciertas condiciones de operación, pero puede no ser preciso para otras.

La técnica de modelado difuso Takagi-Sugeno (T-S) se basa en representar una planta no lineal por un modelo basado en la “combinación pesada” difusa de modelos lineales. Diversos sistemas dinámicos no lineales se pueden representar mediante modelos difusos T-S [Tanaka and Wang, 2004], de hecho se puede demostrar que los modelos difusos T-S son aproximadores universales.

El enfoque utilizado para la construcción de un modelo difuso T-S utiliza el concepto de la condición de sector no lineal o aproximación local, garantizando una construcción exacta del modelo en un rango de operación. Sin embargo, esto en algunas ocasiones es difícil de encontrar para un sistema no lineal general. En este caso se puede considerar un sector local no lineal, lo cual es razonable puesto que los sistemas físicos son siempre acotados.

La principal problemática que se presenta al utilizar la técnica Takagi-Sugeno es la elección de los puntos de operación, de tal forma que al incluir estrategias de control el sistema real converja al punto de operación deseado y, a su vez, la combinación difusa de los modelos lineales debe ser eficiente y sin pérdida de información para poder llevar a cabo una correcta tarea de diagnóstico y control.

1.4 Motivación y justificación

Contribuir a mejorar la seguridad y confiabilidad de procesos industriales teniendo como caso de estudio una columna de destilación utilizando sistemas de detección de fallas basados en redundancia analítica que toma en cuenta las variables medidas disponibles y las posibles fallas a identificar. Motivado por el interés de mejorar en forma integral el sistema de control de una columna de destilación, en este trabajo se adopta la herramienta estructural para determinar la redundancia analítica adecuada (modelado) a partir de parámetros medidos (temperaturas) del proceso.

En esta tesis se realiza el diseño y desarrollo de un esquema de detección y diagnóstico de fallas en sensores y control tolerante a fallas basado en modelado Takagi-Sugeno y observadores de estado difusos con modos deslizantes empleados en un banco de observadores dedicados que faciliten la detección y localización de fallas mejorando la seguridad del proceso de destilación y calidad del producto final.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es desarrollar un esquema de control tolerante a fallas activo a partir de un sistema de detección y aislamiento de fallas (FDI) en sensores y un sistema de detección y diagnóstico de fallas (FDD) para actuadores basados en modelos Takagi-Sugeno y observadores difusos con Modos Deslizantes, con la finalidad de mejorar la calidad del producto destilado, el correcto funcionamiento y seguridad de una columna de destilación binaria.

1.5.2 Objetivos particulares

- Instrumentar y diseñar una estación de monitoreo para la medición de los sensores y el control de los actuadores en una planta piloto de destilación.
- Desarrollar e implementar el modelo Takagi-Sugeno de una columna de destilación binaria tomando como puntos de operación acotados conforme a variables experimentales como el reflujo y las concentraciones del componente ligero en el hervidor y en el condensador.
- Desarrollar e implementar un observador difuso por modos deslizantes para estimar las temperaturas y concentraciones de una planta piloto de destilación de 11 platos considerando como superficie deslizante al error de estimación.
- Desarrollar y validar el modelo en espacio de estados de un actuador de electrónica de potencia para un hervidor.
- Desarrollar y validar el modelo Takagi-Sugeno de un actuador de electrónica de potencia.
- Desarrollar y validar un observador por modos deslizantes para estimar las variables eléctricas de un hervidor de una planta piloto de destilación.
- Desarrollar y validar un sistema de detección de fallas basado en observadores para sensores y un FDD para actuadores de una planta piloto de destilación.
- Desarrollar y validar un sistema de control tolerante a fallas basado en técnicas FDI y FDD para una columna de destilación.

1.6 Metodología

El esquema de control tolerante a fallas que se propone se muestra en la Figura 1.1, el cual consta de un sistema FDI para sensores, un FDD para actuadores y el sistema

de control tolerante aplicado al hervidor de la columna de destilación.

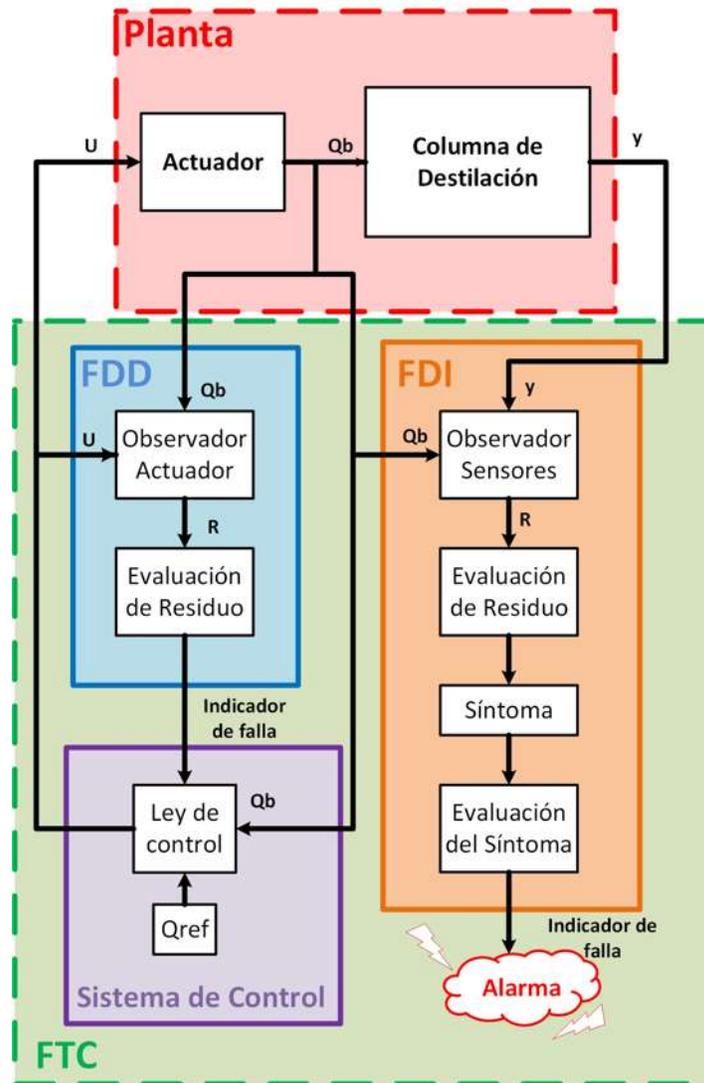


Figura 1.1: Esquema de control tolerante a fallas propuesto

La metodología consiste en:

Diseñar e instrumentar una estación de monitoreo para la columna de destilación utilizando un software de programación visual (LabVIEW), así como un hardware de adquisición de datos para medir la temperatura de sensores RTD en la columna.

Diseñar un modelo no lineal de una columna de destilación tipo Batch, para estimar temperaturas y concentraciones del componente ligero. Revisar distintas técnicas difusas y modelado Takagi-Sugeno para diseñar un modelo difuso Takagi-Sugeno de una columna de destilación tomando como puntos de operación a variables del proceso.

Revisar técnicas de modos deslizantes y LMI's, para diseñar un observador que estime las temperaturas y las concentraciones del componente ligero para una columna de destilación.

Diseñar el modelo de un actuador de potencia eléctrica para implementar un observador por modos deslizantes que estime la potencia calórica del hervidor.

Diseñar e implementar un banco de observadores para detectar fallas en sensores de temperaturas de la columna de destilación.

Diseñar e implementar un observador difuso con modos deslizantes como generador de residuos para detectar fallas en el hervidor.

Diseñar un sistema de control para el actuador de potencia eléctrica que regule la potencia calórica adecuada para la columna de destilación utilizando los indicadores de falla del sistema FDD en el actuador y FDI en sensores.

1.7 Aportaciones

La aportación principal en este trabajo de investigación es el diseño de un sistema de diagnóstico y detección de fallas en sensores de una columna de destilación y esquema de control tolerante a fallas para su actuador utilizando técnicas difusas.

Las aportaciones particulares en las diversas etapas del esquema de control se enlistan a continuación:

- Modelo no lineal de columna de destilación: análisis del efecto de la volatilidad relativa constante y variable en el modelado termodinámico para determinar la concentración del componente ligero.
- Esquema de actuador para hervidor: análisis y diseño de actuador de electrónica de potencia para regular la potencia calórica en el hervidor de una columna de destilación.
- Modelo difuso Takagi-Sugeno para actuador: con base en datos experimentales determinar las variables difusas y sus puntos de operación, el número de reglas y funciones de membresía adecuadas para el diseño de un modelo aplicado a un convertidor de electrónica de potencia.
- Observador para columna de destilación: análisis, diseño y validación de un observador difuso con modos deslizantes en un proceso real de destilación.
- Observador para actuador: análisis, diseño y validación de un observador difuso con modos deslizantes en un convertidor de potencia como actuador para regular la potencia calórica en el hervidor.

- Sistema de detección y aislamiento de fallas para sensores: diseño de un observador difuso con modos deslizantes como generador de residuos para detectar fallas aditivas en los sensores de temperatura y su validación en un proceso de destilación.
- Sistema de detección y diagnóstico de fallas para actuador: diseño de un observador difuso con modos deslizantes para diagnosticar fallas eléctricas en un convertidor de potencia y su validación en simulación.
- Control tolerante a fallas: diseño de un control tolerante a fallas aplicado al actuador para regular potencia calórica en el hervidor de una columna de destilación.

1.8 Contenido de la tesis

Este trabajo se estructura de la siguiente forma:

- Capítulo 2: se presenta el caso de estudio y se describe el modelo difuso Takagi-Sugeno de la columna de destilación y del actuador para el hervidor, así como la validación mediante simulación con respecto al modelo no lineal de cada uno de ellos.
- Capítulo 3: se presenta el análisis y diseño de observadores difusos y difusos con modos deslizantes para la columna de destilación y para el actuador. Se presenta la validación en simulación del observador difuso para la columna de destilación tomando datos reales de un proceso de destilación; también se presenta la validación mediante simulación del observador difuso con modos deslizantes para el actuador con especificaciones del caso de estudio. Se valida de manera experimental con un proceso en línea el observador difuso con modos deslizantes.
- Capítulo 4: se describe el esquema de control tolerante a fallas, el sistema de detección y aislamiento de fallas para los sensores de temperatura, el sistema de detección y diagnóstico de fallas para el actuador y su validación.
- Capítulo 5: se exponen las conclusiones generales y trabajos futuros.

CAPÍTULO 2

MODELADO DE COLUMNA DE DESTILACIÓN Y ACTUADOR

La destilación es el proceso de separación de sustancias químicas más utilizado en la industria, siendo las industrias petroquímica (producción de derivados del petróleo) [Ibrahim et al., 2018] y de alimentos (producción de bebidas alcohólicas) las de mayor importancia, debido al estilo de vida actual de las personas.

El objetivo de la destilación es separar dos o más elementos de una mezcla, donde el elemento más volátil se obtiene como producto destilado. El equipo para realizar el proceso de destilación son las columnas de destilación o las plantas pilotos de destilación, como se muestra en la Figura 2.1, las cuales están compuestas por un condensador, un hervidor y el cuerpo de la columna que consta de $n - 2$ platos perforados. El hervidor es el elemento que proporciona el calor necesario para evaporar la mezcla líquida que se encuentra en él. La corriente de vapor conforme asciende por los platos del cuerpo de la columna se enriquece del elemento ligero, el elemento con el punto de ebullición más bajo de la mezcla. El vapor que llega al condensador se condensa y de acuerdo al estado de la válvula de reflujo se extrae como producto destilado o reingresa a la columna. El líquido que reingresa por el reflujo desciende por la gravedad en el cuerpo de la columna enriqueciéndose con el elemento pesado, el elemento con el punto de ebullición más grande. A cada plato de la columna de destilación le corresponde un grado de pureza del elemento ligero conocido como fracción molar [Téllez, 2010]. Debido al costo de sensores o medidores la fracción molar es medida fuera de línea.

Debido a la gran variedad de sustancias y componentes en la naturaleza y en sus diferentes fases (líquido, vapor, entre otras), existen distintos tipos de destilación para lograr separar diversas mezclas y obtener productos con distintos grados de calidad.

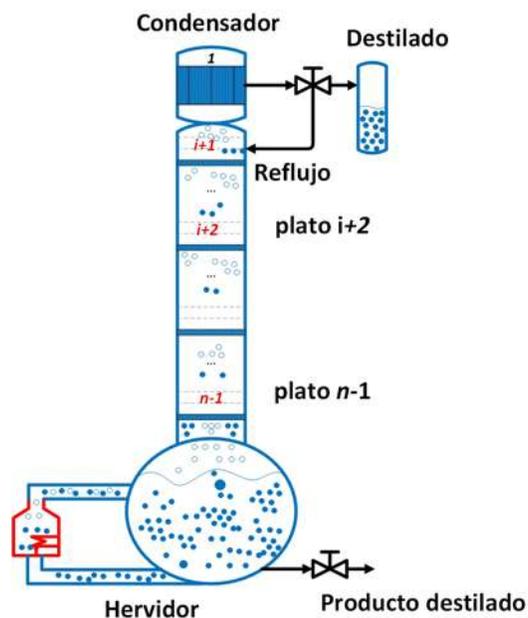


Figura 2.1: Planta de destilación

La destilación al vacío disminuye la presión en la columna para obtener ebullición a bajas temperaturas; la destilación destructiva calienta una sustancia a altas temperaturas para descomponerlas en otros productos y separar después por fraccionamiento en la misma operación, esta destilación es muy usada en el carbón y madera. La destilación extractiva adiciona un agente de separación para mezclas azeotrópicas alterando las volatilidades relativas de los componentes para separarlos.

La destilación fraccionada se utiliza para separar mezclas líquidas homogéneas en las cuales la diferencia entre los puntos de ebullición de los componentes es inferior a 25° C. A cada uno de los componentes separados se les denomina fracciones. De manera general, existen dos modos de operación, continua y por lotes. En el modo continuo, la alimentación de la mezcla líquida y la extracción del producto destilado se realizan de manera continua. En la destilación batch o por lotes, la mezcla se deposita inicialmente en el hervidor, al finalizar el proceso se extraen el producto destilado y de fondo; se utiliza principalmente para separar pequeñas cantidades de mezcla, obtener diferentes calidades del producto destilado para una misma mezcla o para separar mezclas multicomponentes. Por esta razón, una columna de destilación batch no se opera con parámetros constantes, sino que las acciones de control se ajustan continuamente de acuerdo al estado de la destilación; por lo que el monitorear y controlar de manera continua y correcta todas las variables del proceso es indispensable para mejorar la calidad y cantidad del producto destilado, así como también la seguridad del proceso y de los operadores. Para cumplir ese objetivo es necesario contar con modelos y aplicar técnicas de diseño de observadores y controladores.

Debido al costo de las columnas de destilación y a la cantidad de energía que se

maneja en el proceso de destilación, es necesario diseñar estrategias de control adecuadas para monitorear el mayor número de variables del proceso, detectar fallas en los sensores y actuadores para mejorar la calidad del producto destilado y la seguridad del proceso y usuario.

Los actuadores en una columna de destilación tienen un papel muy importante, debido a que pueden modificar variables físicas del proceso como temperatura y presión [Paraschiv and Olteanu, 2015], modificando la pureza del producto a partir del reflujo [Shafeeq et al., 2010] o la velocidad de la destilación.

La Figura 2.2 muestra el diagrama de instrumentos de una planta piloto de destilación donde se presenta la ubicación de los sensores de temperatura y el esquema de actuador con lazo de control en la potencia calórica que regula la cantidad de calor en el hervidor.

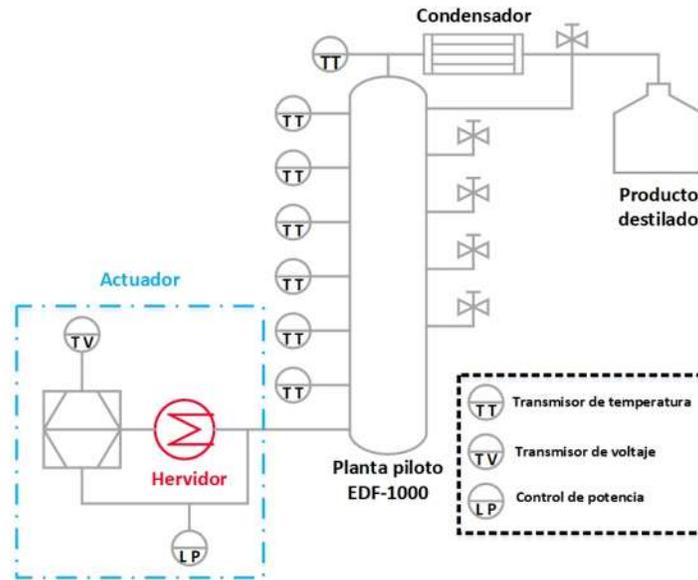


Figura 2.2: Diagrama de instrumentos de planta piloto EDF-1000

2.1 Modelo no lineal de columna de destilación

El modelo matemático de una columna de destilación consiste en un conjunto de ecuaciones diferenciales que representan la dinámica de cada plato de la columna en estado estable, es decir, cuando se destila la primera gota. Generalmente el modelo de una columna de destilación se basa en el balance del componente ligero en todos los platos, como se muestra en (2.1).

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{V(y_{i+1} - y_i) + L(x_{i-1} - x_i)}{M_i} \quad (2.1)$$

donde:

V = flujo molar de vapor.

L = flujo molar de líquido.

M_i = masa retenida en el plato i .

x_i = concentración de líquido en el plato i .

y_i = concentración de vapor en el plato i .

x_{i+1} = concentración de líquido en el plato $i + 1$.

y_{i+1} = concentración de vapor en el plato $i + 1$.

x_{i-1} = concentración de líquido en el plato $i - 1$.

y_{i-1} = concentración de vapor en el plato $i - 1$.

con $x, y \in \mathbb{R} : 0 < x \leq 1, 0 < y \leq 1$

El esquema del condensador se muestra en la Figura 2.3, su dinámica se expresa mediante la ecuación (2.2), considerando que el condensador es el plato 1.

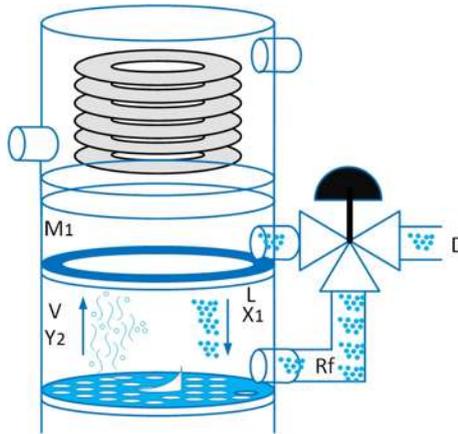


Figura 2.3: Esquema de condensador

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{Vy_2 - Lx_1 - Dx_1}{M_1} \quad (2.2)$$

donde:

M_1 = masa retenida en el condensador.

x_1 = concentración de líquido en el condensador.

y_1 = concentración de vapor en el condensador.

x_2 = concentración de líquido en el plato 2.

y_2 = concentración de vapor en el plato 2.

D = producto destilado.

El cuerpo de la columna se compone por $n - 2$ platos. La Figura 2.4 muestra el esquema de un plato del cuerpo de la columna, así como las variables que interactúan en la dinámica de cada plato, que son expresadas en la ecuación (2.3):

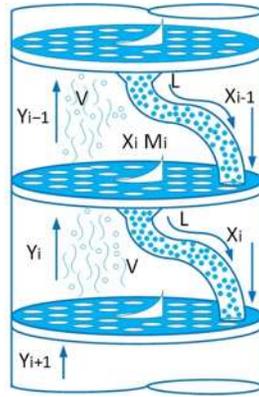


Figura 2.4: Esquema de un plato del cuerpo de la columna.

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{Vy_{i+1} - Vy_i + Lx_{i-1} - Lx_i}{M_i} \quad (2.3)$$

con $i = 2, 3, \dots, n - 1$

La Figura 2.5 muestra el esquema de un hervidor de una columna de destilación; el hervidor es numerado como el plato n , y la dinámica se expresa en la ecuación (2.4).

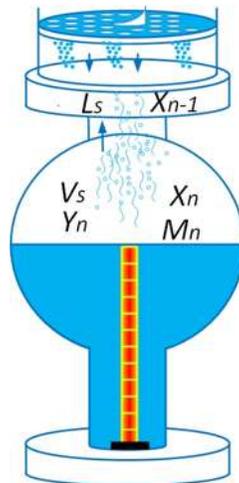


Figura 2.5: Esquema de hervidor.

$$\frac{dx_n}{dt} = \frac{Vx_n - Vy_n + Lx_{n-1} - Lx_n}{M_n} \quad (2.4)$$

donde:
 M_n = masa retenida en el hervidor.

x_n = concentración de líquido en el hervidor.
 y_n = concentración de vapor en el hervidor.
 x_{n-1} = concentración de líquido en el plato $n - 1$.
 n = número total de platos.

Adicionalmente, en el modelo interactúan flujos molares, los cuales para una columna de destilación tipo batch son [Skogestad, 1997]: flujo molar de vapor (2.5), flujo molar de líquido (2.6), producto destilado (2.7).

$$V = \frac{Qb}{H_i^{vap} x_n + H_j^{vap} (1 - x_n)} \quad (2.5)$$

$$L = (1 - Rf)V \quad (2.6)$$

$$D = V - L \quad (2.7)$$

donde

Qb = potencia calórica.

Rf = reflujo.

H_i^{vap} = entalpía de vapor del elemento ligero de la mezcla.

H_j^{vap} = entalpía de vapor del elemento pesado de la mezcla.

La volatilidad relativa se define como una medida de la diferencia entre la presión de vapor de los componentes más volátiles de una mezcla líquida y la presión de vapor de los componentes menos volátiles de la mezcla. La separación de elementos de una mezcla mediante la destilación, es más sencilla cuando la volatilidad de la mezcla considerada constante o variable en el diseño y simulación de modelos no lineales de columnas de destilación binarias es grande.

2.1.1 Volatilidad relativa constante

La volatilidad relativa constante está definida en la relación de equilibrio líquido-vapor para mezclas ideales [Perry and Green, 1999] expresada en la ecuación (2.8).

$$y_i = \frac{\alpha}{1 + (\alpha - 1)x_i} \quad (2.8)$$

donde α es la volatilidad relativa, la cual es $\alpha \neq 1$

El cálculo de la volatilidad relativa se determina por la ecuación (2.9) presentada en [Skogestad, 1997].

$$\ln(\alpha) \approx \frac{\Delta H^{vap}}{RT_B} \frac{\Delta T_B}{T_B} \quad (2.9)$$

donde

$\Delta T_B = T_{BH} - T_{BL}$ es la diferencia del punto de ebullición de los componentes de la mezcla.

T_{BH} es la temperatura de ebullición del componente ligero de la mezcla.

T_{BL} es la temperatura de ebullición del componente pesado de la mezcla.

$T_B = \sqrt{T_{BL}T_{BH}}$ es el promedio geométrico del punto de ebullición.

$\frac{\Delta H^{vap}}{RT_B}$ es 13 típicamente.

De acuerdo a la definición de la volatilidad relativa en función de la concentración de vapor en (2.8), los submodelos del condensador, plato y hervidor, expresados en (2.2), (2.3) y (2.4) se reescriben en (2.10), (2.11) y (2.12) respectivamente.

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{-(V+D)x_1}{M_1} + \frac{V\alpha x_2}{(1+(\alpha-1)x_2)M_1} + \frac{Vx_1}{M_1}R_f \quad (2.10)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{Lx_{i-1}}{M_i} + \frac{-V\alpha x_i}{(1+(\alpha-1)x_i)M_i} - \frac{Lx_i}{M_2} + \frac{V\alpha x_{i+1}}{(1+(\alpha-1)x_{i+1})M_i} \quad (2.11)$$

con $i = 2, 3, \dots, n-1$

$$\frac{dx_n}{dt} = \frac{L(x_{n-1} - x_n)}{M_n} + \frac{x_n Qb}{(H_i^{vap}x_n + H_j^{vap}(1-x_n)M_n)} \left(1 - \frac{\alpha}{(1+(\alpha-1)x_n)}\right) \quad (2.12)$$

Para simplificar el diseño y análisis se describe el modelo de la columna de destilación para n platos en espacio de estados, como se expresa en (2.13):

$$\dot{x} = A(x)x + B(x)u \quad (2.13)$$

donde el vector de estados x corresponde a las concentraciones del elemento ligero, el vector de entradas u está conformado por la potencia calórica Qb y el reflujo Rf .

La matriz de estados $A(x)$ se define por (2.14).

$$A(x) = \begin{pmatrix} \frac{-(V+D)}{M_1} & \frac{V \cdot f(\alpha, x_2)}{M_1} & \dots & 0 & 0 \\ \frac{L}{M_2} & \frac{-V \cdot f(\alpha, x_2) - L}{M_2} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{-V \cdot f(\alpha, x_{n-1}) - L}{M_{n-1}} & \frac{V \cdot f(\alpha, x_n)}{M_{n-1}} \\ 0 & 0 & \dots & \frac{L}{M_n} & -\frac{L}{M_n} \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

y la matriz de entradas $B(x)$ se expresa en (2.15).

$$B(x) = \begin{pmatrix} \frac{Vx_1}{M_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{x_n - V \cdot f(\alpha, x_n)}{(H_i^{vap} x_n + H_j^{vap} (1 - x_n) M_n)} \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

donde la función $f(\alpha, x_i)$ se define en (2.16).

$$f(\alpha, x_i) = \frac{\alpha x_i}{1 + (\alpha - 1)x_i} \quad (2.16)$$

2.1.2 Volatilidad relativa variable

Los autores [Perry and Green, 1999] y [Gmehling et al., 1977] definen a la volatilidad relativa variable como la relación que existe entre las presiones de saturación, el coeficiente de actividad y la presión total del proceso expresadas en el equilibrio líquido-vapor para mezclas no ideales (2.17).

$$y_i P_T = P_i^{sat} x_i \gamma_i \quad (2.17)$$

donde

P_T = presión dentro de la columna.

P_i^{sat} = presión de saturación de los componentes de la mezcla.

γ_i = coeficiente de actividad.

El coeficiente de actividad es dependiente de la concentración de líquido de los elementos de la mezcla, como se muestra en la expresión de Van Laar (2.18).

$$\ln \gamma_1 = A_{12} \left(\frac{A_{21} x_2}{A_{12} x_1 + A_{21} x_2} \right)^2 \quad (2.18)$$

$$\ln \gamma_2 = A_{21} \left(\frac{A_{12} x_1}{A_{12} x_1 + A_{21} x_2} \right)^2$$

donde A_{12} y A_{21} son las constantes de Van Laar determinadas por la mezcla binaria.

El modelo en espacio de estados para una columna de destilación con volatilidad relativa variable expresado de la forma (2.13) se obtiene con la matriz de estados $A(x)$ definida como (2.19):

$$A(x) = \begin{pmatrix} \frac{-(V+D)}{M_1} & \frac{V \cdot G(x_i, \alpha_i)}{M_1} & \dots & 0 & 0 \\ \frac{L}{M_2} & \frac{-V \cdot G(x_i, \alpha_i) - L}{M_2} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{-V \cdot G(x_i, \alpha_{n-1}) - L}{M_{n-1}} & \frac{V \cdot G(x_i, \alpha_n)}{M_{n-1}} \\ 0 & 0 & \dots & \frac{L}{M_n} & -\frac{L}{M_n} \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

y la matriz de entradas $B(x)$ descrita por (2.20).

$$B(x) = \begin{pmatrix} \frac{Vx_1}{M_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{x_n(1-G(x_n, \alpha_n))}{(H_{etha}^{vap} x_n + H_{H2O}^{vap}(1-x_n)M_n)} \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

donde la función $G(x_i, \alpha_i)$ se define en (2.21).

$$G(x_i, \alpha_i) = x_i \frac{P_i^{sat} e^{A_{21} \left(\frac{A_{21}(1-x)}{A_{12}x + A_{21}(1-x)} \right)^2}}{P_T} \quad (2.21)$$

2.1.3 Simulación y comparación de modelos

La simulación de los modelos se realiza con datos reales de entrada (potencia calórica y reflujo) y salida (temperatura en los platos) de un proceso de destilación de Etanol-Agua en una planta piloto de destilación de 12 platos, tipo Batch, con reflujo variable. La Tabla 2.1 de datos de parámetros termodinámicos de la mezcla. Los parámetros iniciales de la mezcla Etanol-Agua se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.1: Parámetros termodinámicos de los componentes de la mezcla Etanol-Agua.

Parámetro	Etanol	Agua
Densidad kg/m^3	0.789	1
Peso molecular g/mol	46.087	18.01528
Entalopía de vaporización J/mol	$38.56x10^3$	$40.65x10^3$

Tabla 2.2: Parámetros iniciales de la mezcla Etanol-Agua.

Parámetro	Valor	Unidades
Volúmen de <i>EtOH</i> en el hervidor	2000	<i>ml</i>
Volúmen de <i>H₂O</i> en el hervidor	2000	<i>ml</i>
Presión total del proceso	637.42	<i>mmHg</i>

Las entradas para los modelos son la potencia calórica (Q_b) y la apertura de la válvula de reflujo (R_f) mostradas en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Parámetros de las entradas para la columna de destilación.

Entrada	Señal	Tiempo
Q_b	Escalón 0-1000J	0 min
R_f	Total	0 min
Q_b	Escalón 1000-1250J	6 min
R_f	Pulso (ton=6s, toff=6s)	12.61 min
R_f	Total	23 min

La dinámica simulada describe el estado estable de las concentraciones en todos los platos de la columna de destilación. Inicialmente las concentraciones de los platos se mantienen constantes debido a que existe un reflujo en la columna de destilación, cuando se activa la válvula de reflujo las concentraciones disminuyen debido al producto que sale de la columna como destilado, cuando se desactiva la válvula las concentraciones vuelven a estado constante.

De acuerdo a la expresión (2.9) la volatilidad constante se determina con los puntos de ebullición de los componentes de la mezcla, para los datos de la simulación es $\alpha = 1.2$, con el modelo correspondiente se calculan las concentraciones del componente ligero en los platos del cuerpo de la columna, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2.6, donde se observa la concentración de cada plato durante el proceso. En 756 s se activa el reflujo en el proceso y las concentraciones de cada plato disminuyen debido al producto destilado que sale de la columna.

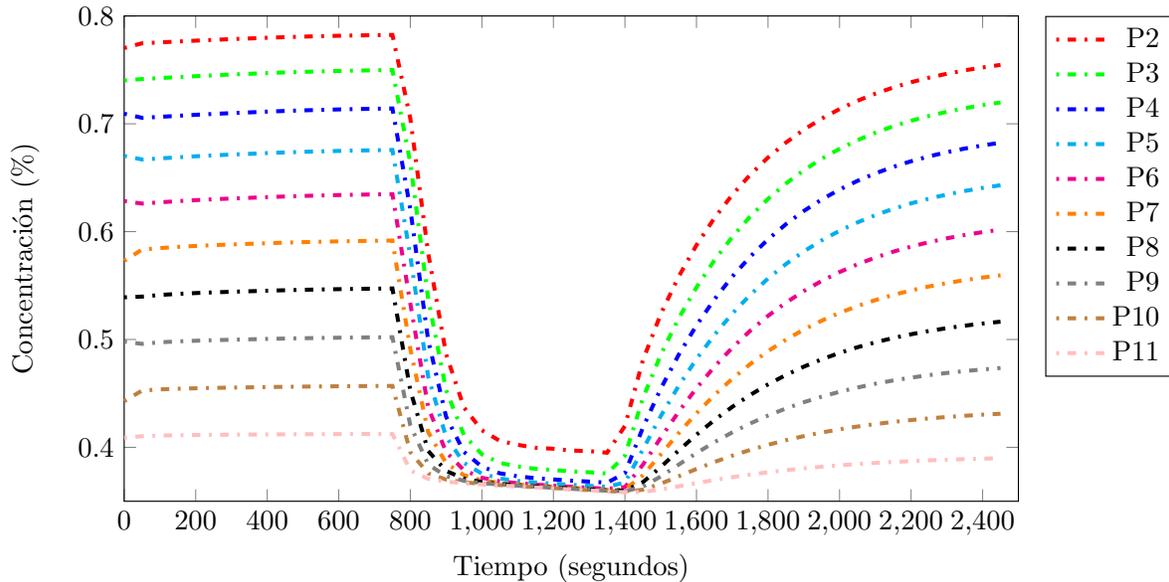


Figura 2.6: Concentraciones en los platos del cuerpo de la columna de volatilidad constante $\alpha = 1.2$.

Considerando la volatilidad relativa variable y dependiente de la concentración en cada plato, con el modelo correspondiente se calculan las concentraciones del componente ligero en los platos de la columna, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2.7. A diferencia de la volatilidad relativa constante, la dinámica de las concentraciones con volatilidad relativa variable en el instante de la activación del reflujo, la concentración de cada plato decrece más lento y de forma exponencial describiendo de mejor forma la dinámica de los platos.

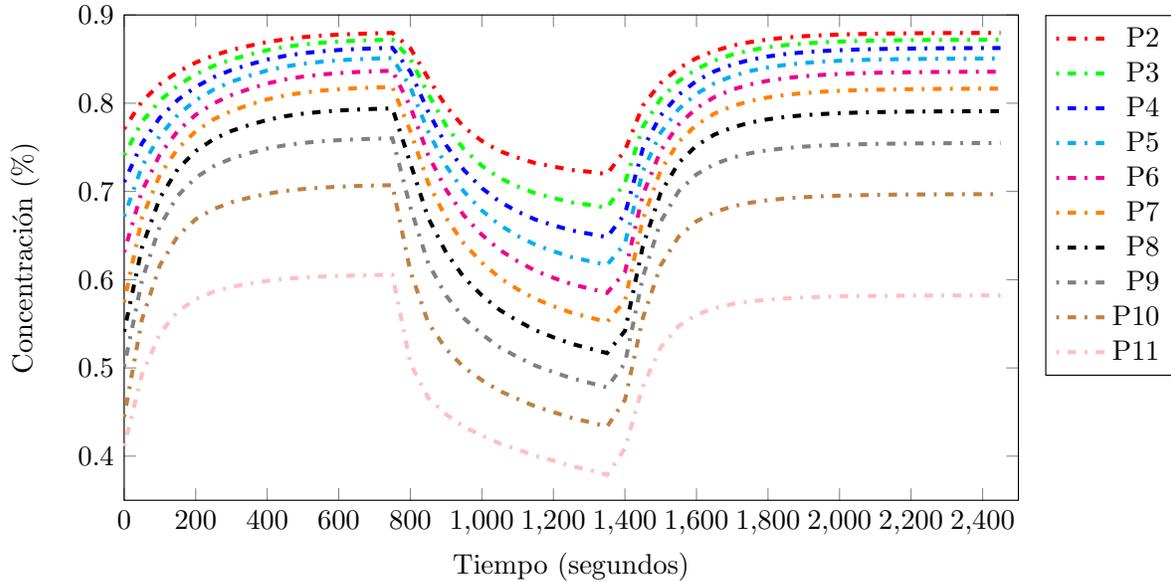


Figura 2.7: Concentraciones en los platos del cuerpo de la columna de volatilidad variable.

En la Figura 2.8 se muestra la comparación de los resultados obtenidos por los modelos y los datos reales de temperatura medidos en el condensador. Se puede observar que la dinámica de concentración con volatilidad constante tiene un decremento más grande que con la volatilidad variable cuando se activa la válvula de reflujo ocasionando traslapes en los platos. Es posible observar que los datos calculados por el modelo con volatilidad relativa variable tienen una mejor aproximación a los datos medidos que los calculados por el modelo con volatilidad relativa constante. El modelo con volatilidad relativa variable tiene un error de estimación menor a $\pm 0.5^\circ$, mientras que el modelo con volatilidad relativa constante se tiene un error máximo de 1.5° durante el reflujo. El error de estimación se determina por la expresión (2.22), donde x_m es la concentración calculada por el modelo y x_{real} es la concentración medida.

$$error = \left| \frac{x_m - x_{real}}{x_{real}} \right| \quad (2.22)$$

En la Figura 2.9 se muestra la comparación de los resultados obtenidos por los modelos y los datos reales de temperatura medidos en el hervidor. Se observa que el error máximo

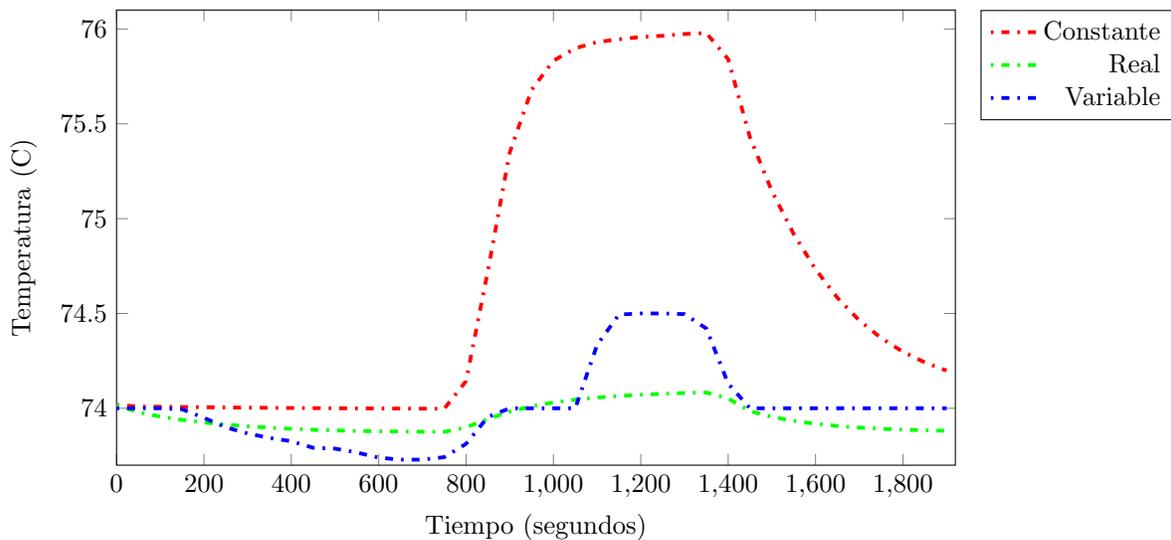


Figura 2.8: Comparación de temperaturas calculadas y medidas en el condensador.

con volatilidad variable es de 7.5° debido al reflujo mientras que el modelo de volatilidad relativa constante el error máximo es de $\pm 1^\circ$.

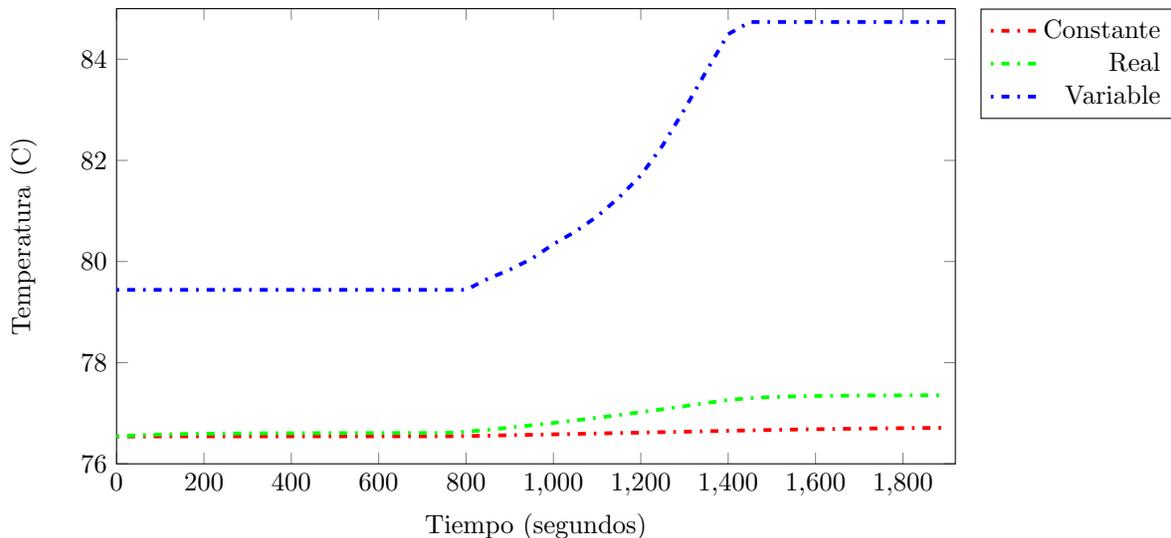


Figura 2.9: Comparación de temperaturas calculadas y medidas en el hervidor.

La comparación de modelos con datos de temperatura medidos en un proceso permite determinar cuál modelo tiene una mejor representación dinámica con respecto al sistema real, con la finalidad de diseñar e implementar técnicas de control. El modelo considerando a la volatilidad variable muestra una mejor representación de la dinámica

de la columna de destilación durante el reflujo y además sus resultados presentan un menor error de estimación en la sección de enriquecimiento (parte superior de la columna de destilación). El porcentaje de error que se tiene en los modelos presentados es aceptable para la función que realiza debido a que forma parte de un observador. El observador es un estimador de estados con la capacidad de corregir el error de estimación que genera el modelo matemático a partir de una entrada real y una salida medida.

2.2 Caso de estudio: Planta piloto EDF-1000

Como caso de estudio se tiene a una planta piloto de destilación EDF-1000 que se muestra en la Figura 2.10, constituida por 11 platos perforados, de los cuales, 7 tienen sensores de temperatura RTD (PT100) ubicados en el condensador (plato 1), plato 2, 4, 6, 8, 10 y en el hervidor (plato 11).

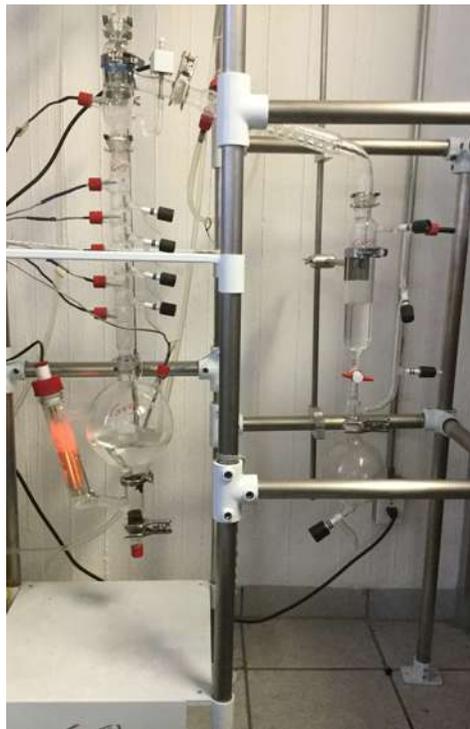


Figura 2.10: Planta piloto EDF-1000

Las características físicas más importantes de la planta piloto EDF-1000 son:

- Hervidor de calentamiento de 2 litros.
- Resistencia calefactora de 300 watts.
- Llave de vaciado para el producto de fondo.

- Doble condensador de espiral.
- Matraz de depósito para producto destilado de un litro.
- Válvula on-off para el reflujo.

2.2.1 Modelo en espacio de estados del caso de estudio

El modelo matemático de la columna de destilación EDF-1000 de 11 platos para una mezcla binaria se expresa en (2.23), considerando las concentraciones del componente ligero de la mezcla en todos los platos de la columna como los estados del sistema $(x_1, x_2, \dots, x_{10}, x_{11})$, donde la concentración en el condensador es x_1 y la concentración en el hervidor x_{11} , además las entradas de control son la potencia calórica Q_f y el reflujo R_f .

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} \frac{-(V+D)}{M_1} & \frac{V \cdot G(x_1, \alpha_1)}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{L}{M_2} & \frac{-V \cdot G(x_2, \alpha_2) - L}{M_2} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{-V \cdot G(x_{10}, \alpha_{10}) - L}{M_{10}} & \frac{V \cdot G(x_{11}, \alpha_{11})}{M_{10}} \\ 0 & 0 & \dots & \frac{L}{M_{11}} & -\frac{L}{M_{11}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{10} \\ x_{11} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{V x_1}{M_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{x_n(1-G(x_n, \alpha_n))}{(H_{etha}^{vap} x_n + H_{H2O}^{vap}(1-x_n))M_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_f \\ Q_b \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

además las salidas del sistema son los estados estimados del modelo definidos en (2.24)

$$y = C \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{10} \\ x_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{10} \\ x_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{10} \\ x_{11} \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

Para el caso de estudio en el modelo de la columna de destilación se realizan las siguientes consideraciones:

- Presión constante en toda la columna.

- Flujos de entrada y salida de la columna en estado líquido.
- Sin retención de vapor.
- Equilibrio de vapor y líquido y perfectamente mezclado en todos los platos.
- Columna de destilación adiabática.
- Alimentación tipo batch.

Los resultados del análisis y validación mediante simulación de los modelos no lineales de la columna de destilación se presentan en [Orozco et al., 2016].

2.2.2 Modelo difuso Takagi-Sugeno de caso de estudio

La representación difusa Takagi-Sugeno (T-S) de sistemas no lineales es una técnica muy utilizada actualmente para desarrollar estrategias de control. El modelado T-S para sistemas no lineales utiliza conceptos de lógica difusa y una representación de múltiples sistemas lineales en espacio de estados, conocidos como subsistemas. La representación del sistema no lineal se logra mediante una sumatoria ponderada de todos los subsistemas, con las ventajas del diseño de los sistemas lineales [Murray-Smith and Johansen, 1997][Tanaka and Wang, 2004].

Para el análisis de la estabilidad de los controladores y observadores difusos para el modelo Takagi-Sugeno se utiliza el análisis de Lyapunov, con la ventaja que además se puede adaptar perfectamente para el diseño de los mismo mediante el cálculo de sus ganancias. [Lian et al., 2006][Tanaka and Sugeno, 1992].

El modelo T-S [Takagi and Sugeno, 1985] es la representación difusa de un modelo no lineal que resulta de la interpolación de subsistemas lineales de acuerdo a reglas difusas de la forma (2.25):

$$\begin{array}{l}
 \text{Regla para modelo } i \\
 \mathbf{Si } z_i(t) \text{ es } M_{z_i} \text{ y } \dots \text{ y } z_p(t) \text{ es } M_{z_p} \\
 \\
 \mathbf{Entonces : } \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t)
 \end{array} \tag{2.25}$$

donde:

$i = 1, 2, \dots, r$

$z_i(t)$ = variables premisas.

M_{z_i} = conjuntos difusos.

r = número de subsistemas lineales.

$x(t)$ = vector de estados.

$u(t)$ = entradas de control.

A_i = matrices de estado de los submodelos lineales conocidos.
 B_i = vector de entradas de cada subsistema conocido.

Cada ecuación consecutiva lineal representada por $A_i x(t) + B_i u(t)$ se llama subsistema y representa un punto de operación del sistema no lineal.

Dado el par $(x(t); u(t))$, el modelo difuso total se obtiene usando un fuzificador tipo singleton, un mecanismo de inferencia tipo producto y un centro de gravedad como defuzificador, descrito en (2.26) para los estados:

$$\dot{x} = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \quad (2.26)$$

y en (2.27) para las salidas:

$$y(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))(C_i x(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \quad (2.27)$$

donde el vector para p variables premisas $z(t)$ se define en (2.28).

$$z(t) = [z_1(t), z_2(t), \dots, z_p(t)] \quad (2.28)$$

y el peso normalizado h_i para cada regla i en (2.29).

$$h_i[z_i(t)] = \frac{w_i(z_i(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z_i(t))} \quad (2.29)$$

además el peso calculado $w_i(z(t))$ para cada regla i a partir de las funciones de membresía se definen por la ecuación (2.30)

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p M_{ij} z_j(t) \quad (2.30)$$

por lo tanto la representación difusa Takagi-Sugeno de un sistema no lineal se expresa en (2.31)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sum_{i=1}^r h(z(t))(A_i x(t) + B_i(t)u(t)) \\ y &= \sum_{i=1}^r h(z(t))(C_i x(t)) \end{aligned} \quad (2.31)$$

De acuerdo al modelo no lineal en espacio de estados del caso de estudio expresado en (2.23), el cual presenta no linealidades en las matrices A y B ya que ambas son dependientes de los estados, además la entrada de reflujo R_f perturba a todos los estados del sistema (concentraciones) cuando se activa.

Se consideran como variables premisas del modelo difuso al porcentaje de apertura de la válvula de reflujo ($z_3 = R_f$) debido al efecto que tiene en todos los estados del sistema, la concentración del componente ligero en el condensador ($z_2 = x_1$), ya que es donde se obtiene el producto destilado y la concentración en el hervidor ($z_1 = x_{11}$), ya que contiene la mezcla que se desea separar y está relacionada directamente con la potencia calórica (entrada del sistema), la cual es la encargada de proporcionar la energía para evaporar la mezcla.

De acuerdo a la dinámica en estado estable de la columna de destilación, se eligen funciones de membresía del tipo trapezoidal con dos reglas para cada una, expresadas matemáticamente en (2.32) y (2.33). Se selecciona este tipo de función debido a que permite un mayor rango en el universo de discurso donde el grado de pertenencia sea de 1, lo cual evita que haya una oscilación cuando los estados se estabilizan.

$$M_1 = \begin{cases} 1 & , z < a \\ \frac{b-z}{b-a} & , a \leq z \leq b \\ 0 & , z > b \end{cases} \quad (2.32)$$

$$M_2 = \begin{cases} 0 & , z < a \\ \frac{z-a}{b-a} & , a \leq z \leq b \\ 1 & , z > b \end{cases} \quad (2.33)$$

El número de subsistemas del modelo difuso Takagi-Sugeno es dependiente del número de combinaciones que las funciones de membresía pueden tener, para el caso de estudio considerando 3 variables premisas ($z_1 = x_{11}$, $z_2 = x_1$ y $z_3 = R_f$) con dos reglas cada una (z_{imax} y z_{imin}), el número de subsistemas es de $2^3 = 8$.

De acuerdo a las características presentadas de la planta piloto EDF-1000 en (2.2) y a las propiedades termódinámicas de la mezcla binaria Etanol-Agua, los puntos de operación en estado estable para las variables difusas son (2.34), los cuales son obtenidas de forma experimental.

$$\begin{aligned} z_1 &= [z_{1_{min}}, z_{1_{max}}] = [0.09, 0.23] \\ z_2 &= [z_{2_{min}}, z_{2_{max}}] = [0.8, 0.89] \\ z_3 &= [z_{3_{min}}, z_{3_{max}}] = [0.05, 0.45] \end{aligned} \quad (2.34)$$

Regla para modelo 1
Si $z_1(t)$ es M_1 , $z_2(t)$ es M_3 y $z_3(t)$ es M_5

Entonces

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_1 x(t) + B_1 u(t) \\ y &= C_1 x(t) \end{aligned} \quad (2.35)$$

Regla para modelo 2

Si $z_1(t)$ es M_1 , $z_2(t)$ es M_3 y $z_3(t)$ es M_6

Entonces

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_2x(t) + B_2u(t) \\ y &= C_2x(t)\end{aligned}\tag{2.36}$$

Regla para modelo 3

Si $z_1(t)$ es M_1 , $z_2(t)$ es M_4 y $z_3(t)$ es M_5

Entonces

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_3x(t) + B_3u(t) \\ y &= C_3x(t)\end{aligned}\tag{2.37}$$

Regla para modelo 4

Si $z_1(t)$ es M_1 , $z_2(t)$ es M_4 y $z_3(t)$ es M_6

Entonces

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_4x(t) + B_4u(t) \\ y &= C_4x(t)\end{aligned}\tag{2.38}$$

Regla para modelo 5

Si $z_1(t)$ es M_2 , $z_2(t)$ es M_3 y $z_3(t)$ es M_5

Entonces

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_5x(t) + B_5u(t) \\ y &= C_5x(t)\end{aligned}\tag{2.39}$$

Regla para modelo 6

Si $z_1(t)$ es M_2 , $z_2(t)$ es M_3 y $z_3(t)$ es M_6

Entonces

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_6x(t) + B_6u(t) \\ y &= C_6x(t)\end{aligned}\tag{2.40}$$

Regla para modelo 7

Si $z_1(t)$ es M_2 , $z_2(t)$ es M_4 y $z_3(t)$ es M_5

Entonces

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_7x(t) + B_7u(t) \\ y &= C_7x(t)\end{aligned}\tag{2.41}$$

Regla para modelo 8

Si $z_1(t)$ es M_2 , $z_2(t)$ es M_4 y $z_3(t)$ es M_6

Entonces

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_8x(t) + B_8u(t) \\ y &= C_8x(t)\end{aligned}\tag{2.42}$$

donde:

M_1 y M_2 son los conjuntos difusos para la variable premisa $z_1(t)$.

M_3 y M_4 son los conjuntos difusos para la variable premisa $z_2(t)$.

M_5 y M_6 son los conjuntos difusos para la variable premisa $z_3(t)$.

$$A_1 = A_7 = \begin{pmatrix} \frac{-(V+D)}{M_1} & \frac{V \cdot G(z_{2min}, \alpha_1)}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{L}{M_2} & \frac{-V \cdot G(x_2, \alpha_2) - L}{M_2} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{-V \cdot G(x_{10}, \alpha_{10}) - L}{M_{10}} & \frac{V \cdot G(z_{1max}, \alpha_{11})}{M_{10}} \\ 0 & 0 & \dots & \frac{L}{M_{11}} & -\frac{M_{10}}{M_{11}} \end{pmatrix}$$

$$A_2 = A_4 = \begin{pmatrix} \frac{-(V+D)}{M_1} & \frac{V \cdot G(z_{2max}, \alpha_1)}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{L}{M_2} & \frac{-V \cdot G(x_2, \alpha_2) - L}{M_2} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{-V \cdot G(x_{10}, \alpha_{10}) - L}{M_{10}} & \frac{V \cdot G(z_{1max}, \alpha_{11})}{M_{10}} \\ 0 & 0 & \dots & \frac{L}{M_{11}} & -\frac{M_{10}}{M_{11}} \end{pmatrix}$$

$$A_3 = A_5 = \begin{pmatrix} \frac{-(V+D)}{M_1} & \frac{V \cdot G(z_{2min}, \alpha_1)}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{L}{M_2} & \frac{-V \cdot G(x_2, \alpha_2) - L}{M_2} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{-V \cdot G(x_{10}, \alpha_{10}) - L}{M_{10}} & \frac{V \cdot G(z_{1min}, \alpha_{11})}{M_{10}} \\ 0 & 0 & \dots & \frac{L}{M_{11}} & -\frac{M_{10}}{M_{11}} \end{pmatrix}$$

$$A_6 = A_8 = \begin{pmatrix} \frac{-(V+D)}{M_1} & \frac{V \cdot G(z_{2max}, \alpha_1)}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{L}{M_2} & \frac{-V \cdot G(x_2, \alpha_2) - L}{M_2} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{-V \cdot G(x_{10}, \alpha_{10}) - L}{M_{10}} & \frac{V \cdot G(z_{1min}, \alpha_{11})}{M_{10}} \\ 0 & 0 & \dots & \frac{L}{M_{11}} & -\frac{M_{10}}{M_{11}} \end{pmatrix}$$

$$B_1 = B_7 = \begin{pmatrix} \frac{V z_{2min}}{M_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{z_{1max}(1-G(x_{11}, \alpha_{11}))}{(H_{etha}^{vap} z_{1max} + H_{H_2O}^{vap}(1-z_{1max}))M_{11}} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
B_2 = B_4 &= \begin{pmatrix} \frac{Vz_{2max}}{M_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{z_{1max}(1-G(z_{1max},\alpha_{11}))}{(H_{etha}^{vap}z_{1max}+H_{H2O}^{vap}(1-z_{1max}))M_{11}} \end{pmatrix} \\
B_3 = B_5 &= \begin{pmatrix} \frac{Vz_{2min}}{M_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{z_{1min}(1-G(z_{1min},\alpha_{11}))}{(H_{etha}^{vap}z_{1min}+H_{H2O}^{vap}(1-z_{1min}))M_{11}} \end{pmatrix} \\
B_6 = B_8 &= \begin{pmatrix} \frac{Vz_{2max}}{M_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{z_{1min}(1-G(z_{1min},\alpha_{11}))}{(H_{etha}^{vap}z_{1min}+H_{H2O}^{vap}(1-z_{1min}))M_{11}} \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

De acuerdo a las reglas difusas, el modelo difuso Takagi-Sugeno de la columna de destilación EDF-1000 se expresa en (2.43)

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= \sum_{i=1}^8 h_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\
y(t) &= \sum_{i=1}^8 h_i(z(t))(C_i x(t))
\end{aligned} \tag{2.43}$$

Adicionalmente, en [del Carmen Téllez-Anguiano et al., 2017] el diseño y simulación de un modelo difuso Takagi-Sugeno de una columna de destilación tomando como variables difusas al flujo molar de líquido (L) y de vapor (V) La validación del modelo Takagi-Sugeno se realiza mediante simulación con datos reales de una planta piloto, los cuales fueron presentados y publicados en [del Carmen Téllez-Anguiano et al., 2017].

2.3 Simulación del modelo Takagi-Sugeno de una columna de destilación

La simulación del modelo difuso Takagi-Sugeno se realiza en Matlab con datos reales de entrada (potencia calórica y reflujo) y salida (temperaturas en los platos) de un proceso de destilación de Etanol-Agua para una columna de destilación de 11 platos. Los parámetros de la mezcla inicial se muestran en la Tabla 2.4.

Las características de las entradas del proceso de potencia calórica (Q_b) y reflujo (R_f) para la simulación del modelo se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.4: Parámetros iniciales de la mezcla binaria.

Parámetro	Valor	Unidades
Volúmen de $EtOH$ en hervidor	2000	ml
Volúmen de H_2O en hervidor	2000	ml
Presión total	637.42	$mmHg$

Tabla 2.5: Parámetros de entrada

Entrada	Señal	Tiempo
Q_b	Escalón 0-800 J	0 min
R_f	Total	0 min
Q_b	Escalón 800-1000J	3.3 min
Q_b	Escalón 1000-1250J	5.98 min
R_f	Pulso (ton=6 s, toff=6 s)	12.61 min
Q_b	Escalón 1250-1100 J	14.78 min
Q_b	Escalón 1100-950 J	17.15 min
Q_b	Escalón 950-1100 J	19.36 min
R_f	Total	23 min
Q_b	Escalón 1100-1250 J	24.88 min

En la Figura 2.11 se muestran las estimaciones de la concentración del componente ligero (Etanol) en cada plato de la columna de destilación para el proceso de la Tabla 2.5. Se observa que al segundo 756 de la simulación la concentración de cada plato decrece debido a la activación de la válvula de reflujo que extrae producto destilado de condensador provocando cambios en el equilibrio de fases de líquido-vapor en cada plato. En el tiempo 1400 s se desactiva la válvula de reflujo y la concentración en los platos se mantiene constante.

En la Figura 2.12 se muestra la dinámica de la temperaturas de cada plato correspondiente al grado de concentración de la Figura 2.11. Se observa que al activar la válvula de reflujo las temperaturas de los platos aumentan debido al producto destilado que sale de la columna.

2.4 Esquema del actuador

El hervidor es el actuador que provee la cantidad de calor necesaria para calentar y evaporar la mezcla a destilar. Por lo general los hervidores controlan la potencia calórica a partir de la potencia eléctrica. La cantidad de potencia calórica generada permite controlar la velocidad para la destilación en el proceso. Es muy importante regular la temperatura en un valor adecuado, debido a que en ciertas mezclas a distintas temperaturas se tienen diferentes productos, como el caso de destilación del petróleo.

El generar de manera inadecuada el intercambio de calor entre hervidor y mezcla en el proceso de destilación puede ocasionar variaciones de temperaturas, calentamiento no uniforme en la mezcla, choques térmicos en los platos, entre otros daños, por lo tanto

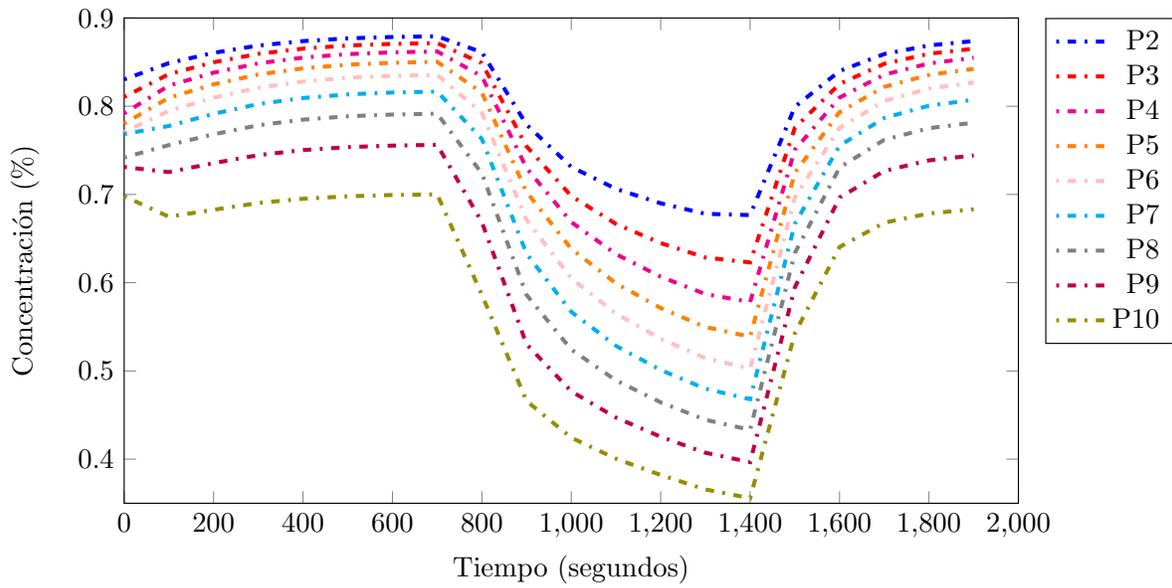


Figura 2.11: Estimación de las concentraciones en los platos de la columna de destilación del modelo Takagi-Sugeno.

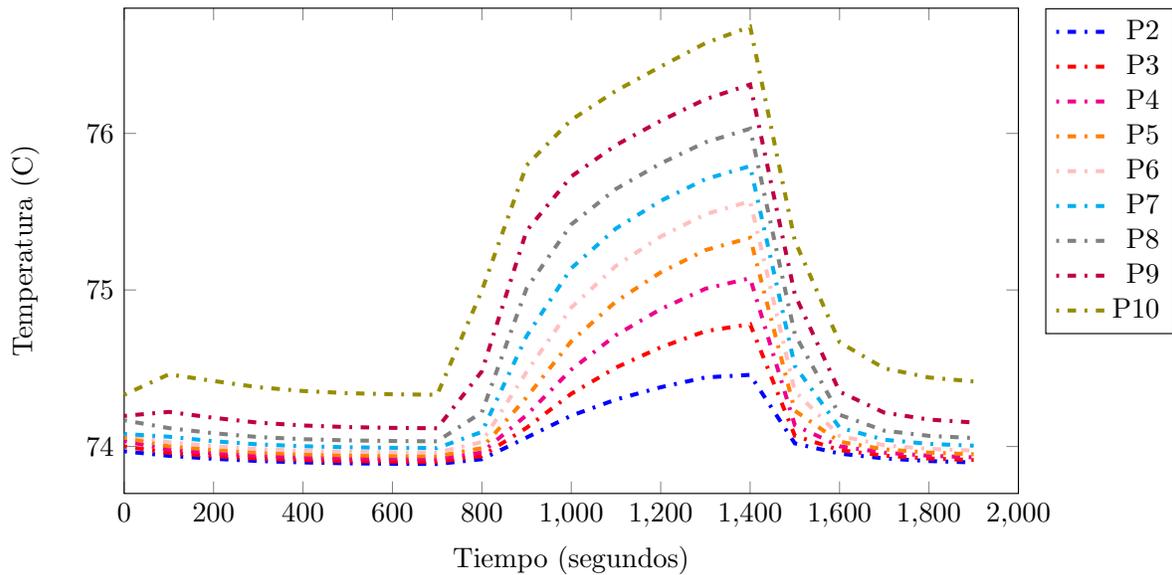


Figura 2.12: Estimación de las temperaturas en los platos de la columna de destilación del modelo Takagi-Sugeno.

diseñar técnicas de modelado y control son tareas constante en la investigación para evitar riesgos para el usuario y daños en el equipo [Paraschiv and Olteanu, 2015].

El hervidor del caso de estudio está formado por dos tanques donde se deposita

la mezcla y se calienta por medio de una resistencia calefactora. En la Figura 2.13 se muestra el esquema de un hervidor de 2 tanques para una planta piloto de destilación.

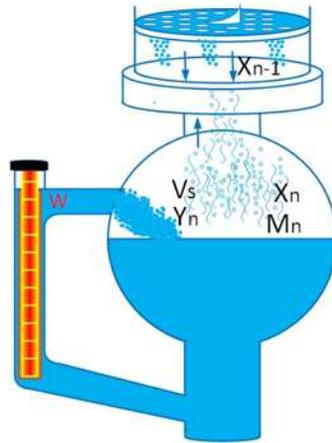


Figura 2.13: Hervidor de 2 tanques

La potencia calórica está determinada por la Ley de Joule [Hyde et al., 1997] expresada como:

La cantidad de calor que se genera por una corriente eléctrica al pasar por un conductor es directamente proporcional a la resistencia del conductor, al cuadrado de la intensidad de la corriente y al tiempo que dura la corriente pasando por el conductor.

La ley de Joule se describe por (2.44)

$$J = i^2 R t \quad (2.44)$$

donde:

J = Cantidad de Calor (Joules)

i = Corriente Eléctrica (Amperes)

R = Resistencia (Ohms)

t = Tiempo (Segundos)

La ley de la conservación de la energía afirma que la energía no puede crearse ni destruirse, sólo se puede cambiar de una forma a otra. La Ley de Joule expresada en Potencia Eléctrica (P) se expresa en (2.45):

$$w = P t \quad (2.45)$$

La resistencia calefactora convierte energía eléctrica en calor haciendo circular corriente en el conductor, por lo tanto la potencia calórica de un hervidor puede ser manipulada y modelada a partir de la potencia eléctrica disipada por la resistencia.

El esquema del actuador se muestra en la Figura 2.14, el cual ajusta la potencia en la resistencia calefactora del hervidor mediante la regulación del voltaje con un convertidor CD-CD. Los convertidores de CD-CD tienen la capacidad de regular el voltaje de salida a un valor deseado a partir de la conmutación de dispositivos electrónicos, generalmente diodos y transistores. Estos convertidores de electrónica de potencia tienen aplicaciones en sistemas de energía renovables, redes inteligentes (smart grids), sistemas de alimentación de equipo doméstico y de laboratorio [Arazi et al., 2018][Rojas et al., 2018]. Las topologías básicas de los convertidores CD-CD son Buck, Boost y Buck-Boost [Rashid, 2017]. El convertidor Buck se caracteriza por que el voltaje de salida es menor al de entrada, el convertidor Boost se caracteriza por que el voltaje de salida es mayor que el de entrada y el convertidor Buck-Boost es un convertidor reductor-elevador en función del ciclo de servicio (d), donde el voltaje de salida (V_{out}) se define en (2.46). Para d menor a 0.5 es un convertidor reductor y para d mayor a 0.5 un convertidor elevador.

$$V_{out} = -\frac{V_{cc}d}{1-d} \quad (2.46)$$

con $0 < d < 1$

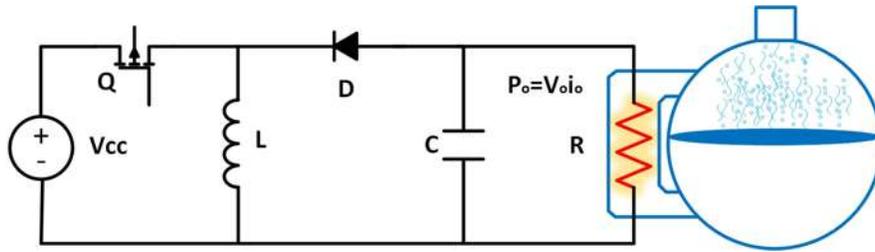


Figura 2.14: Esquema de actuador de potencia calórica

Las variaciones en el voltaje de entrada y en la carga, así como las perturbaciones y el deterioro de los componentes que conforman a los convertidores de potencia [Tarakanath et al., 2014], son factores no deseados que afectan directamente su rendimiento, confiabilidad y seguridad, de ahí la importancia de diseñar e implementar estrategias de control que faciliten la regulación del voltaje de salida, estimando o identificando parámetros fundamentales en su operación para mejorar dicha seguridad y fiabilidad en el sistema.

2.4.1 Modelo en espacio de estados del convertidor Buck-Boost

El modelo del convertidor Buck-Boost se obtiene a partir del encendido y apagado del interruptor Q , es decir, del conjunto de expresiones que se obtienen por cada estado

topológico. El sistema es llevado a la forma matricial de estados (2.47) tomando como variables de estado la corriente del inductor (i_L) y el voltaje en el capacitor (v_C).

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.47)$$

Durante el tiempo de encendido ($t = ON$), el convertidor queda descrito de la forma (2.48):

$$\dot{x}(t) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ v_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} V_{cc} \quad (2.48)$$

Durante el tiempo de apagado ($t = OFF$), el convertidor queda descrito de la forma (2.49):

$$\dot{x}(t) = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ v_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} V_{cc} \quad (2.49)$$

El modelo resultante del convertidor Buck-Boost es un modelo conmutado entre dos subsistemas lineales, representados en (2.48) y (2.49), que conmutan a partir del estado del interruptor Q . La representación general del sistema en forma matricial (2.47) es expresada en (2.50).

$$\dot{x}(t) = A_k x(t) + B_k u(t) \quad (2.50)$$

donde k es el subsistema para cada estado del interruptor:

$$k = 1, 2$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix}$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix}$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$x = \begin{pmatrix} i_L \\ v_C \end{pmatrix}$$

2.4.2 Modelo no lineal de convertidor Buck-Boost

El modelo no lineal del convertidor implica unificar los subsistemas lineales e incluir la variable de control u , la cual está determinada por el ciclo de servicio y toma valores entre 0 y 1, como se muestra en (2.51):

$$\dot{x}(t) = (A_1 x + b_1)d + (A_2 x + b_2)(1 - d) \quad (2.51)$$

o de manera equivalente en (2.52):

$$\dot{x}(t) = A_2x + b_2 + (A_1 - A_2)xd + (b_1 - b_2)d \quad (2.52)$$

donde el ciclo de servicio d para el convertidor Buck-Boost está determinado por (2.53):

$$d = \frac{V_{out}}{V_{out} - V_{cc}} \quad (2.53)$$

La respuesta de este modelo entrega un promedio de ambos submodelos lineales (2.48) y (2.49).

$$\dot{x}(t) = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{L_1} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{V_{cc} - x_2}{L} \\ \frac{x_1}{C} \end{pmatrix} d \quad (2.54)$$

2.4.3 Modelo Takagi-Sugeno de convertidor Buck-Boost

Con base en el modelo no lineal del convertidor Buck-Boost presentado en (2.54) y tomando como variables difusas a los estados ($z_1 = v_C, z_2 = i_L$) que operan entre valores nominales máximos y mínimos ($v_{C_{max}}, v_{C_{min}}, i_{L_{max}}, i_{L_{min}}$) se propone un modelo difuso T-S que interpola entre 4 submodelos lineales basado en las siguientes reglas:

Regla 1:

Si z_1 es $z_{1_{min}}$ y si z_2 es $z_{2_{min}}$

Entonces:

$$\dot{x}(t) = A_1x(t) + B_1d \quad (2.55)$$

Regla 2:

Si z_1 es $z_{1_{min}}$ y si z_2 es $z_{2_{max}}$

Entonces:

$$\dot{x}(t) = A_2x(t) + B_2d \quad (2.56)$$

Regla 3:

Si z_1 es $z_{1_{max}}$ y si z_2 es $z_{2_{min}}$

Entonces:

$$\dot{x}(t) = A_3x(t) + B_3d \quad (2.57)$$

Regla 4:

Si z_1 es $z_{1_{max}}$ y si z_2 es $z_{2_{max}}$

Entonces:

$$\dot{x}(t) = A_4x(t) + B_4d \quad (2.58)$$

De acuerdo a las características del convertidor, los submodelos lineales se obtienen mediante el sector no lineal ($z = [max, min]$).

donde:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{L_1} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} = A_2 = A_3 = A_4 = A$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} \frac{V_{in}+z_{1_{min}}}{\frac{L}{z_{2_{min}}}} \\ \frac{z_{2_{min}}}{C} \end{pmatrix}, B_2 = \begin{pmatrix} \frac{V_{in}+z_{1_{min}}}{\frac{L}{z_{2_{max}}}} \\ \frac{z_{2_{max}}}{C} \end{pmatrix}, B_3 = \begin{pmatrix} \frac{V_{in}+z_{1_{max}}}{\frac{L}{z_{2_{min}}}} \\ \frac{z_{2_{min}}}{C} \end{pmatrix}, B_4 = \begin{pmatrix} \frac{V_{in}+z_{1_{max}}}{\frac{L}{z_{2_{max}}}} \\ \frac{z_{2_{max}}}{C} \end{pmatrix}$$

$$C_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = C_2 = C_3 = C_4 = C$$

Las funciones de membresía ($\mu(z)$) para los conjuntos difusos están determinadas por la ecuación (2.59) para el voltaje en el capacitor $v_C = z_1$:

$$\mu(z_1) = \begin{cases} \mu_{z_{1_{min}}} = \frac{z_{1_{max}} - z_1}{z_{1_{max}} - z_{1_{min}}} \\ \mu_{z_{1_{max}}} = 1 - \mu_{z_{1_{min}}} \end{cases} \quad (2.59)$$

y la ecuación (2.60) para la corriente en el inductor $i_L = z_2$:

$$\mu(z_2) = \begin{cases} \mu_{z_{2_{min}}} = \frac{z_{2_{max}} - z_2}{z_{2_{max}} - z_{2_{min}}} \\ \mu_{z_{2_{max}}} = 1 - \mu_{z_{2_{min}}} \end{cases} \quad (2.60)$$

Los pesos normalizados están dados por (2.61):

$$\begin{aligned} h_1(z_1, z_2) &= \mu_{z_{1_{min}}} \mu_{z_{2_{min}}} \\ h_2(z_1, z_2) &= \mu_{z_{1_{min}}} \mu_{z_{2_{max}}} \\ h_3(z_1, z_2) &= \mu_{z_{1_{max}}} \mu_{z_{2_{min}}} \\ h_4(z_1, z_2) &= \mu_{z_{1_{max}}} \mu_{z_{2_{max}}} \end{aligned} \quad (2.61)$$

El modelo difuso T-S para el convertidor CD-CD se expresa en (2.62), para $r = 4$.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + \left(\sum_{i=1}^r h_i(z_1, z_2) B_i \right) d \\ y(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z_1, z_2) C_i x(t) \end{aligned} \quad (2.62)$$

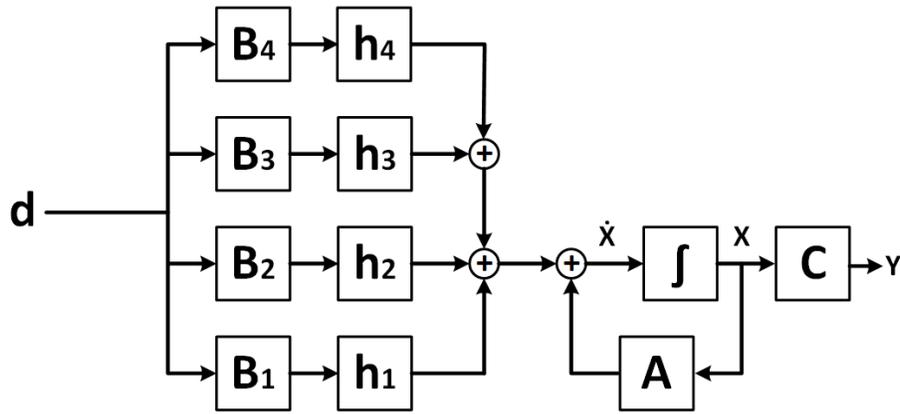


Figura 2.15: Diagrama a bloques de modelo difuso Takagi-Sugeno para convertidor CD-CD

En la Figura 2.15 se muestra el diagrama a bloques de modelo difuso T-S del convertidor Buck-Boost expresado en (2.62),

d es el ciclo de servicio y la señal de control del modelo difuso, ya que es un parámetro del convertidor que controla la conmutación del transistor.

En [Cervantes et al., 2015b] se publica el diseño y simulación de modelo Takagi-Sugeno de un convertidor Buck-Boost para 8 reglas difusas logrando mayor resolución en variaciones en carga pero con mayor número de submodelos lineales. Por simplicidad en la implementación se selecciona el modelo con 4 reglas difusas.

2.5 Simulación del modelo Takagi-Sugeno del convertidor Buck-Boost

La simulación del modelo difuso Takagi-Sugeno se realiza en Matlab con datos de la Tabla 2.6. Además los puntos de operación de las variables difusas se eligen $z_1 = [-300, 0]$ y $z_2 = [-5, 30]$ como los valores máximos y mínimos de operación en simulación.

La Figura 2.16 muestra la dinámica de la corriente en el inductor para el modelo no lineal con condiciones iniciales $i_L(0) = 0$ A y para el modelo Takagi-Sugeno con $x_1(0) = 1$ A con la finalidad de validar la convergencia y la fiabilidad del modelo Takagi-Sugeno para el estado transitorio y en estado estable.

En la Figura 2.17 se muestra la dinámica del voltaje del capacitor v_C en estado transitorio y estable con condiciones iniciales distintas del modelo difuso Takagi-Sugeno. Las condición inicial de voltaje en el modelo no lineal es de $v_C(0) = 0$ V y el del modelo difuso de $x_2(0) = -10$ V y se observa la convergencia tanto estado estable como en

Tabla 2.6: Parámetros de operación de convertidor Buck-Boost.

Parámetro	Magnitud
Voltaje de entrada V_{in}	180 V
Voltaje de salida v_C	-229 V
Corriente en inductor i_L	7.3 A
Frecuencia de conmutación f	20 kHz
Carga R	70.3 Ω
Inductor L	5 mH
Capacitor C	78 μF
Ciclo de servicio d	0.56

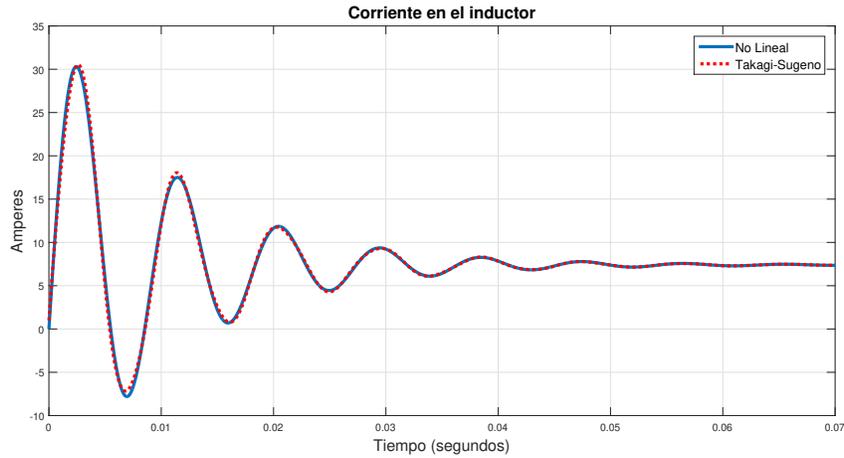


Figura 2.16: Transitorio de corriente en el inductor i_L del modelo T-S del convertidor

transitorio. La finalidad de colocar condiciones iniciales distintas en el modelo Takagi-Sugeno es para validar la convergencia de los estados con respecto a los del modelo no lineal.

Las Figuras 2.18 y 2.19 muestran la simulación de modelo Takagi-Sugeno del convertidor Buck-Boost realizando variaciones en el voltaje de alimentación (v_{in}). En 0.1 s de la simulación se decrementa el voltaje de entrada a $v_{in} = 150$ V y en 0.2 s se aumenta a $v_{in} = 210$ V. En la Figura 2.19 se muestra la dinámica de la corriente en el inductor ante las perturbaciones de voltaje entrada. Se observa que el modelo T-S describe de igual forma las oscilaciones de la corriente que el modelo no lineal.

La Figura 2.18 muestra el voltaje del capacitor v_C del modelo no lineal y del T-S con perturbaciones en el voltaje de entrada de la fuente V_{in} y se observa que el modelo T-S tiene un error de estimación de 16 V con respecto al modelo no lineal, el cual puede ser corregido implementando un observador.

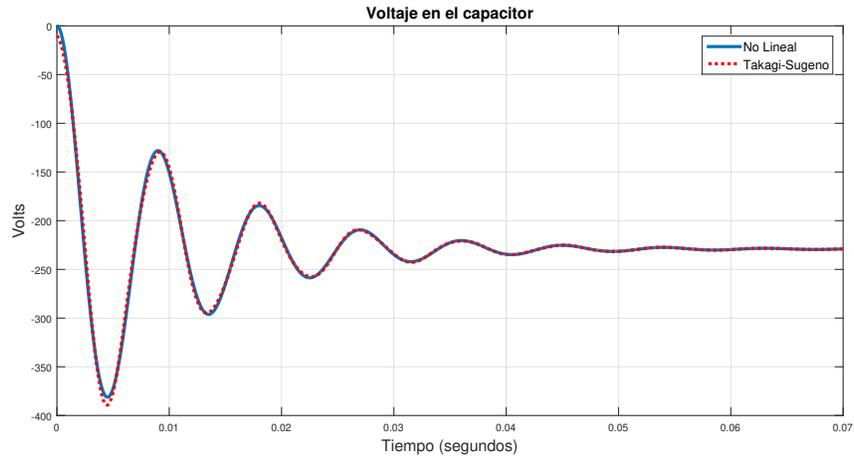


Figura 2.17: Transitorio de voltaje en el capacitor v_C del modelo T-S del convertidor

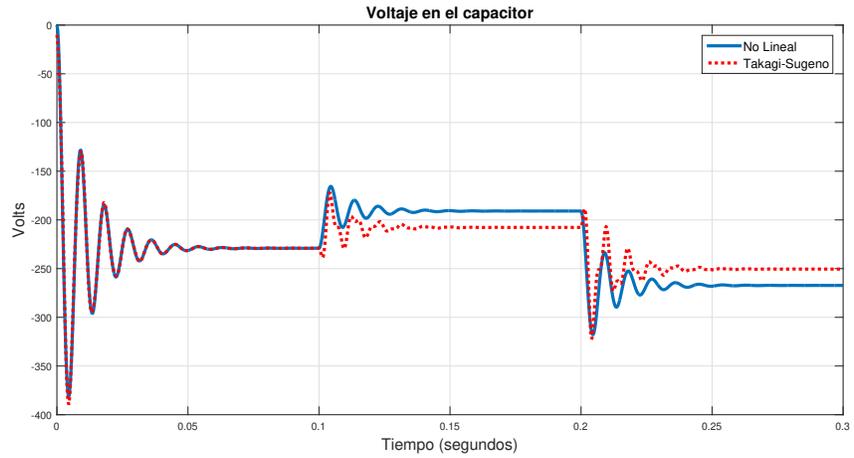


Figura 2.18: Voltaje en el capacitor v_C con perturbaciones en el voltaje de entrada v_{in}

2.6 Conclusiones

En este capítulo se presenta el modelo no lineal de una columna de destilación binaria, se realiza una comparativa del efecto de la volatilidad considerando un parámetro constante determinado por las propiedades termodinámicas de la mezcla o variable en función de la concentración de líquido y de vapor del componente ligero. También se presenta el modelo difuso Takagi-Sugeno respecto a un caso de estudio particular, las variables premisas consideradas son las concentraciones del componente ligero en el condensador ya que es donde se tiene el producto destilado, en el hervidor por estar asociado a la entrada de calor y al reflujo por el efecto perturbador en la dinámica de todos los platos. Los modelos son simulados con datos de entradas y salidas reales de un proceso de destilación de la planta piloto de destilación EDF-1000.

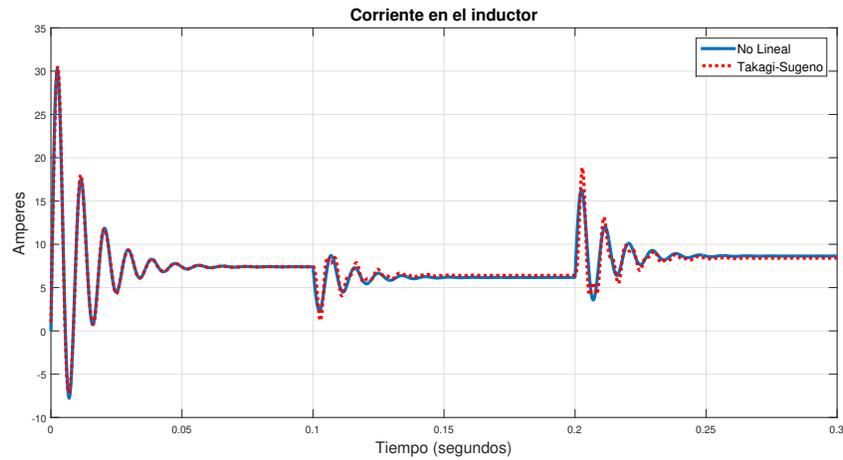


Figura 2.19: Corriente en el inductor i_L con perturbaciones en el voltaje de entrada v_{in}

Se presenta también el esquema de un actuador basado en electrónica de potencia para regular la potencia calórica en la resistencia calefactora del hervidor, con la finalidad de mantener uniforme el calentamiento de la mezcla a destilar para evitar choques térmicos debido al calentamiento no controlado. El actuador está compuesto por un convertidor Buck-Boost el cual se modela con Takagi-Sugeno para implementar estrategias de control lineales debido a la complejidad en la implementación de las técnicas no lineales. El modelo es simulado en Matlab para verificar su comportamiento en estado transitorio y estable, así como el efecto en variaciones paramétricas.

CAPÍTULO 3

OBSERVADORES

Un observador de estados es un sistema dinámico que estima variables de estado o parámetros a partir de mediciones disponibles. En la actualidad los observadores, también llamados sensores virtuales, son ampliamente utilizados debido a que permiten estimar variables difíciles de medir de un sistema a partir de algoritmos matemáticos y mediciones disponibles, además son adecuados para detectar y localizar fallas en actuadores y en sensores. Los observadores tienen un procedimiento de diseño sistemático y sencillo, lo que facilita su implementación y ejecución en tiempo real. El modelo matemático es parte fundamental de un observador ya que permite describir la dinámica de un sistema real.

Dado un sistema expresado de la forma (2.47), la ecuación general de un observador para la reconstrucción o estimación de estados de un sistema se describe en (3.1):

$$\dot{\hat{x}}(t) = \underbrace{A\hat{x} + Bu(t)}_{\text{Predictor}} + \underbrace{L(y(t) - \hat{y}(t))}_{\text{Corrector}} \quad (3.1)$$

donde $\hat{x} \in \mathfrak{R}$ representa la estimación de estado para todo tiempo $\tau > t_0$ y la salida estimada se define en (3.2):

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \quad (3.2)$$

El sistema presentado en (3.1) y (3.2) también se denota como observador identidad de Luenberger y se acopla al proceso original a través de las entradas y de las salidas, como de muestra en la Figura 3.1. El observador consta de 2 partes: una predictiva, basada en el modelo del sistema por observar, y una correctiva, formada por el error de estimación definido por la diferencia entre la salida real $y(t)$ y la estimada \hat{y} , expresada en (3.3):

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (3.3)$$

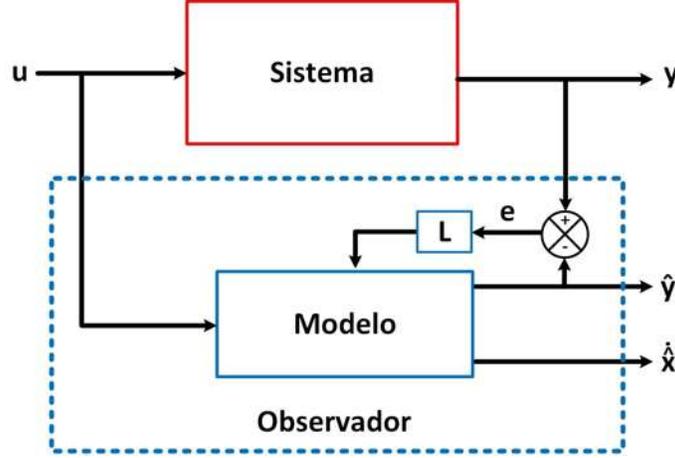


Figura 3.1: Esquema general de observador de estados

3.1 Observador difuso

Combinando el modelo difuso Taki-Sugeno de un sistema no lineal expresado en (2.31) con el observador de Luenberger (3.1) se obtiene la estructura general de un observador difuso [Tanaka et al., 1998].

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + K_i \tilde{e}] \\ \hat{y}(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i \hat{x}(t)\end{aligned}\quad (3.4)$$

Tanaka en [Tanaka and Sugeno, 1992] demuestra la estabilidad del observador difuso siempre y cuando exista una matriz P que satisfaga las LMI's expresadas en (3.5):

$$\begin{aligned}P &> 0 \\ N_i &> 0 \\ A_i^T P - C_i^T N_i^T + P A_i - N_i C_i &< 0 \\ A_i^T P - C_j^T N_i^T + P A_i - N_i C_j + P A_j^T - C_i^T N_j^T + P A_j - N_j C_i &< 0 \\ &i < j\end{aligned}\quad (3.5)$$

3.2 Observador robusto a variación de parámetros

La estructura general del observador con modos deslizantes propuesta en [Anzurez-Marín, 2007], se expresa en (3.6)

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A \hat{x}(t) + B u(t) + K(y(t) - \hat{y}(t)) + \varphi(t) \\ \hat{y}(t) &= C \hat{x}(t)\end{aligned}\quad (3.6)$$

donde, $\varphi(t)$ es el vector discontinuo de modos deslizantes.

Para el análisis de la convergencia, el error de estimación $e(t)$ se define en (3.7)

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (3.7)$$

La dinámica del error $\dot{e}(t)$ se define en (3.8)

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \\ &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) - A\hat{x}(t) - Bu(t) - K(y(t) - \hat{y}(t)) - \varphi(t) \\ &= A(x(t) - \hat{x}(t)) + Ed(t) - KC(x(t) - \hat{x}(t)) - \varphi(t) \\ \dot{e}(t) &= \bar{A}e(t) + Ed(t) - \varphi(t) \end{aligned} \quad (3.8)$$

donde \bar{A} se define en (3.9)

$$\bar{A} = (A - KC) \quad (3.9)$$

dada la función de Lyapunov $v(t)$ expresada en (3.10)

$$v(t) = e^T(t)P_{sm}e(t) \quad (3.10)$$

se deriva (3.10) omitiendo la dependencia del tiempo.

$$\begin{aligned} \dot{v} &= e^T P_{sm} \dot{e} + \dot{e}^T P_{sm} e \\ \dot{v} &= e^T P_{sm} [\bar{A}e + Ed - \varphi] + [\bar{A}e + Ed - \varphi]^T P_{sm} e \\ \dot{v} &= e^T P_{sm} \bar{A}e + e^T P_{sm} Ed - e^T P_{sm} \varphi + e^T \bar{A} P_{sm} e + d^T E^T P_{sm} e - \varphi^T P_{sm} e \\ \dot{v} &= e^T [P_{sm} \bar{A} + \bar{A}^T P_{sm}] e + 2e^T P_{sm} Ed - 2e^T P_{sm} \varphi \end{aligned} \quad (3.11)$$

y se define el término γ como (3.12)

$$\gamma = P_{sm} \bar{A} + \bar{A}^T P_{sm} \quad (3.12)$$

Reescribiendo (3.11)

$$\dot{v} = \gamma \|e\|^2 + 2 \|e^T P_{sm}\| \|Ed\| - 2e^T P_{sm} \varphi \quad (3.13)$$

Ya que γ corresponde a una desigualdad de Lyapunov ésta es esdefinida negativa, por lo que el termino $\gamma \|e\|^2$ es negativo. Para lograr la condición de $\dot{v} < 0$, se propone que φ tenga la siguiente forma

$$\varphi^T = M \frac{e^T P_{sm}}{\|e^T P_{sm}\|} = M \text{sign}(e^T P_{sm}) \quad (3.14)$$

donde:

M es una ganancia constante positiva.

P_{sm} es una matriz definida positiva, la cual debe cumplir la ecuación de Lyapunov.

$$P_{sm} \bar{A} + \bar{A}^T P_{sm} < 0 \quad (3.15)$$

Omitiendo el término $\gamma||e||^2$ en la ecuación (3.13), ya que este siempre tiene un valor negativo.

$$\begin{aligned} 2||e^T P_{sm}|| ||Ed|| - 2e^T P_{sm} [M \frac{e^T P_{sm}}{||e^T P_{sm}||}] &< 0 \\ 2||e^T P_{sm}|| [||Ed|| - M] &< 0 \\ ||Ed|| &< M \end{aligned} \quad (3.16)$$

Se selecciona un valor de M lo suficientemente grande para satisfacer la condición (3.16).

3.3 Observador difuso con modos deslizantes

El observador difuso con modos deslizantes [Castillo-Toledo and Anzures-Marin, 2005] se basa en los fundamentos del observador de Luenberger [Luenberger, 1966] para sistemas lineales y del observador difuso de Tanaka en [Tanaka et al., 1998].

Utilizando el observador difuso (3.4), es posible la construcción de observadores locales con modos deslizantes para cada subsistema lineal [Anzures-Marín, 2007]. Donde cada observador está asociado a una regla difusa i dada como:

$$\begin{aligned} &\text{Si:} \\ &z_1(t) \text{ es } M1 \text{ y, } \dots \text{, y } z_p(t) \text{ es } Mp, \\ \text{Entonces : } &\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + K_i (y(t) - \hat{y}(t)) + \varphi_i(t) \\ \hat{y}(t) = C_i \hat{x}(t) \end{cases} \end{aligned}$$

El observador completo está dado por la suma ponderada de cada subsistema.

$$\dot{\hat{x}}(t) = \sum_{i=1}^N h_i(z(t)) [A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + K_i C_i (x(t) - \hat{x}(t)) + \varphi_i(t)] \quad (3.17)$$

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^N h_i(z(t)) C_i \hat{x}(t) \quad (3.18)$$

$\varphi_i(t)$ es el vector discontinuo de modos deslizantes para el subsistema i , el cual tiene la siguiente forma:

$$\varphi(t)_i = M_i \text{sign}(P_i e(t)) \quad (3.19)$$

donde,

$M_i > 0$ constante positiva.

$P_i > 0$ así la ecuación de Lyapunov se cumple.

$e(t)$ está definido como el error de estado estimado.

$$e(t) = (x(t) - \widehat{x(t)}) \quad (3.20)$$

La estabilidad del observador completo está demostrada si cada par A_i, C_i es observable y P_i cumple con la ecuación de Lyapunov.

$$P_i \overline{A}_i + \overline{A}_i^T P_i < 0 \quad (3.21)$$

donde,

$$\overline{A}_i = A_i - K_i C_i \quad (3.22)$$

La estructura del observador difuso con modos deslizantes para sistemas Takagi-Sugeno definida en [Bergsten et al., 2002] [Castillo-Toledo and Anzures-Marin, 2005], se expresa en (3.23)

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + K_i \tilde{e} + \varphi_i(t)] \\ \hat{y}(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i \hat{x}(t) \end{aligned} \quad (3.23)$$

El error de estimación del observador difuso con modos deslizantes es determinado por la expresión,

$$\tilde{e}(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (3.24)$$

y $\varphi_i(t)$ es el vector discontinuo de modos deslizantes para el subsistema i , tomando como superficie deslizante al error de estimación y se expresa en (3.25):

$$\varphi(t)_i = \text{sign}(\tilde{e}^T P) \quad (3.25)$$

La estabilidad del sistema difuso expresado en (3.23) se obtiene utilizando funciones de Lyapunov tipo cuadráticas de la forma (3.26);

$$V(x(t)) = x^T P x(t) \quad (3.26)$$

se garantiza la estabilidad asintótica, si existe una matriz P positiva definida ($P > 0$) tal que, cumpla la ecuación de Lyapunov expresada en (3.27).

$$A_i^T P + P A_i < 0 \quad (3.27)$$

para cada subsistema con $i = 1, 2, \dots, r$.

Las desigualdades matriciales lineales (LMI) resultantes que garantizan la estabilidad del observador difuso en todos los subsistemas y la combinación de ellos, se expresan

en (3.28):

$$\begin{aligned}
& P > 0 \\
& N_i > 0 \\
& A_i^T P - C_i^T N_i^T + P A_i - N_i C_i < 0 \\
& A_i^T P - C_j^T N_i^T + P A_i - N_i C_j + P A_j^T - C_i^T N_j^T + P A_j - N_j C_i < 0 \\
& \quad \quad \quad i < j
\end{aligned} \tag{3.28}$$

Las ganancias del observador se definen por la solución del sistemas de LMI's definida en (3.29)

$$K_i = P_i^{-1} N_i \tag{3.29}$$

3.4 Observadores para columna de destilación

El objetivo de implementar un observador en la columna de destilación es estimar la concentración del componente ligero en todos los platos de la columna de destilación debido a la complejidad y el costo del sensor de fracción molar. La estimación de la concentración puede ser determinada mediante un observador.

Mediante la medición de las entradas, potencia calórica y porcentaje de reflujo, así como la medición de temperatura de los platos 1, 2, 4, 6, 8, 10 y 11 de columna es posible estimar la fracción molar del componente ligero y de las temperaturas en todos los platos.

3.4.1 Observador difuso para columna de destilación

De acuerdo al modelo difuso Takagi-Sugeno para la planta piloto de destilación EDF-1000 presentado en (2.43), la expresión del observador difuso se expresa en (3.30).

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{x}}(t) &= \sum_{i=1}^8 h_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t) + K_i(\tilde{e})) \\
\hat{y}(t) &= \sum_{i=1}^8 h_i(z(t))(C x(t))
\end{aligned} \tag{3.30}$$

donde la matriz de salidas C queda definida en (3.31), considerando siete concentraciones de los platos y como variables difusas a la concentración en el hervidor ($z_1 = x_{11}$), la concentración en el condensador ($z_2 = x_1$) y al reflujo ($z_3 = rf$).

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{3.31}$$

El error de estimación del observador se define por la diferencia de los estados del modelo (\dot{x}) y los estados estimados del observador ($\hat{\dot{x}}$) expresado en (3.32).

$$\tilde{e} = C(\dot{x} - \hat{\dot{x}}) \quad (3.32)$$

El esquema del observador difuso propuesto para el modelo de la columna de destilación del caso de estudio se muestra en la Figura 3.2, tomando como entradas a la potencia calórica y la acción de reflujo, los estados estimados son las concentraciones ($\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{11}$) y las temperaturas ($\hat{t}_1, \hat{t}_2, \dots, \hat{t}_{11}$) en todos los platos.

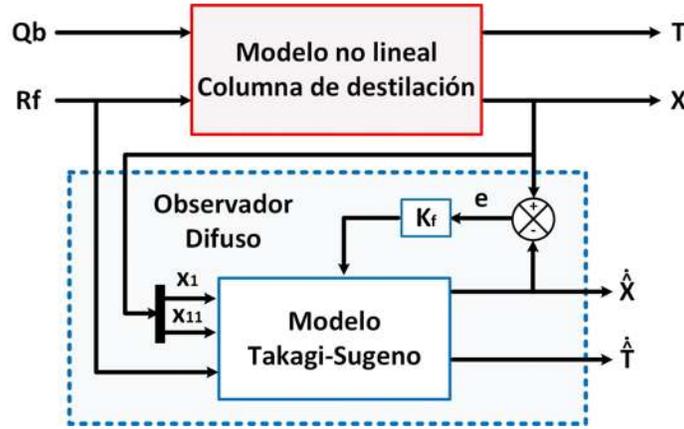


Figura 3.2: Esquema a bloques del observador difuso para la columna de destilación EDF-1000.

El sistema de LMI's propias de cada subsistema para el observador difuso con ocho reglas, se expresa en (3.33).

$$\begin{aligned} A_1^T P - C_1^T N_1^T + P A_1 - N_1 C_1 &< 0 \\ A_2^T P - C_2^T N_2^T + P A_2 - N_2 C_2 &< 0 \\ &\vdots \\ A_7^T P - C_7^T N_7^T + P A_7 - N_7 C_7 &< 0 \\ A_8^T P - C_8^T N_8^T + P A_8 - N_8 C_8 &< 0 \end{aligned} \quad (3.33)$$

Las LMI's que representan los traslapes de las funciones de membresía se expresan en

(3.34)

$$\begin{aligned}
& A_1^T P - C_2^T N_1^T + PA_1 - N_1 C_2 + PA_2^T - C_1^T N_2^T + PA_2 - N_2 C_1 < 0 \\
& A_1^T P - C_3^T N_1^T + PA_1 - N_1 C_3 + PA_3^T - C_1^T N_3^T + PA_3 - N_3 C_1 < 0 \\
& \quad \vdots \\
& A_1^T P - C_7^T N_1^T + PA_1 - N_1 C_7 + PA_7^T - C_1^T N_7^T + PA_7 - N_7 C_1 < 0 \\
& A_2^T P - C_3^T N_2^T + PA_2 - N_2 C_3 + PA_3^T - C_2^T N_3^T + PA_3 - N_3 C_2 < 0 \\
& A_2^T P - C_4^T N_2^T + PA_2 - N_2 C_4 + PA_4^T - C_2^T N_4^T + PA_4 - N_4 C_2 < 0 \\
& \quad \vdots \\
& A_2^T P - C_7^T N_2^T + PA_2 - N_2 C_7 + PA_7^T - C_2^T N_7^T + PA_7 - N_7 C_2 < 0 \\
& A_3^T P - C_4^T N_3^T + PA_3 - N_3 C_4 + PA_4^T - C_3^T N_4^T + PA_4 - N_4 C_3 < 0 \\
& A_3^T P - C_5^T N_3^T + PA_3 - N_3 C_5 + PA_5^T - C_3^T N_5^T + PA_5 - N_5 C_3 < 0 \\
& \quad \vdots \\
& A_5^T P - C_6^T N_5^T + PA_5 - N_5 C_6 + PA_6^T - C_5^T N_6^T + PA_6 - N_6 C_5 < 0 \\
& A_6^T P - C_7^T N_6^T + PA_6 - N_6 C_7 + PA_7^T - C_6^T N_7^T + PA_7 - N_7 C_6 < 0
\end{aligned} \tag{3.34}$$

además, P es una matriz diagonal definida positiva ($P > 0$) de dimensión 11×11 en la expresión (3.35)

$$P_{11 \times 11} > 0 \tag{3.35}$$

y N es una matriz auxiliar dependiente del número de estados (11) y de las salidas medidas (7), por lo que es de dimensión de 7×11 .

El sistema resultante de 36 LMI's se soluciona utilizando herramientas de MATLAB. Resuelto el sistema de LMI's con $P > 0$ para garantizar la estabilidad a lazo cerrado de cada subsistema se calculan las ganancias K_i

$$\begin{aligned}
K_1 &= P^{-1} N_1 \\
K_2 &= P^{-1} N_2 \\
&\quad \vdots \\
K_7 &= P^{-1} N_7 \\
K_8 &= P^{-1} N_8
\end{aligned} \tag{3.36}$$

3.4.2 Observador difuso con modos deslizantes para columna de destilación

A partir del observador difuso para la planta piloto de destilación EDF-1000 representado en (3.30), el correspondiente observador difuso con modos deslizantes se presenta en (3.37).

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{x}}(t) &= \sum_{i=1}^8 h_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t) + K_i(\tilde{e}) + \varphi(t)) \\
\hat{y}(t) &= \sum_{i=1}^8 h_i(z(t))(C x(t))
\end{aligned} \tag{3.37}$$

El vector deslizante $\varphi(t)$ se define como (3.38), tomando como superficie deslizante al producto entre error de estimación \tilde{e} y una matriz P positiva definida ($P > 0$).

$$\varphi(t) = \text{sign}(\tilde{e}'P) \quad (3.38)$$

donde el error de estimación $\tilde{e}(t)$ expresado en (3.16) se define como la diferencia entre los estados medidos del sistema y los estados estimados por el observador difuso con modos deslizantes.

$$\tilde{e}_{\phi_c}(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (3.39)$$

De acuerdo a las características de análisis y diseño entre el observador difuso y el observador difuso con modos deslizantes, la estabilidad y las ganancias se determinan de forma similar a las expresadas en (3.34) para el análisis de estabilidad y el cálculo de la matriz P , y en (3.36) para las ganancias K_i .

El esquema general del observador difuso con modos deslizantes para la columna de destilación EDF-1000 se muestra en la Figura 3.3. donde, las entradas del sistema son

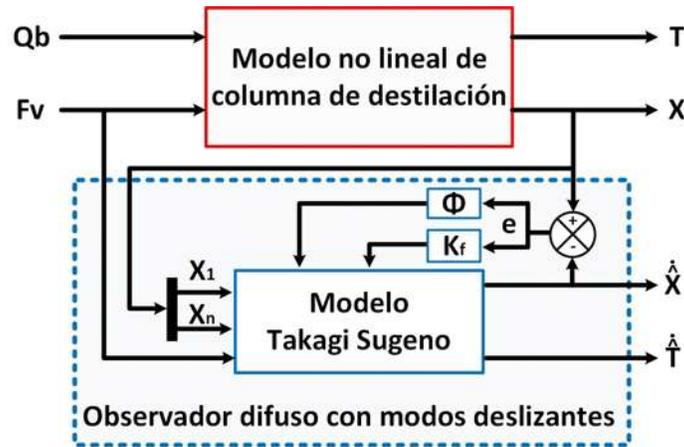


Figura 3.3: Esquema a bloques del observador difuso con modos deslizantes para la columna de destilación EDF-1000.

la potencia calórica (Qb) y la acción de reflujo (Fv), las variables difusas son la concentración en condensador (x_1) y en el hervidor (x_{11}) y la acción de reflujo, los estados estimados del observador son las concentraciones ($\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_{11}$) y las temperaturas ($\hat{t}_1, \hat{t}_2, \dots, \hat{t}_{11}$) en todos los platos.

3.4.3 Simulación del observador difuso para una columna de destilación

La simulación del observador difuso se realiza utilizando datos reales de un proceso de destilación, expresados en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2

Tabla 3.1: Parámetros de la mezcla para validación del observador difuso

Parámetro	Magnitud
Volumen de EtOH en el hervidor	1000 <i>ml</i>
Volumen de H2O en el hervidor	1000 <i>ml</i>
Presión total del proceso	662 <i>mmHg</i>

Tabla 3.2: Parámetros de los componentes de la mezcla para la validación del observador difuso

Parámetro	Etanol	Agua
Densidad (ρ_i)	0.789	1
Peso Molecular (W_i)	46.069	18.0528
Temperatura de ebullición (T_{bi})	78.4	100

La duración del proceso en estado estable es de 50 min, con las condiciones iniciales tomadas de un proceso de destilación real en los platos de:

$$x(0) = (0.8555, 0.8525, 0.8480, 0.8412, 0.8309, 0.8148, 0.7896, 0.7483, 0.6767, 0.5369, 0.2300)$$

Las características de las señales de entrada durante el proceso de destilación se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Características de las entradas del proceso para validación de observador difuso

Entrada	Señal	Tiempo
Q_b	Escalón 0-1000 J	0 min
F_v	Total	0 min
F_v	Pulso (ton = 6 s, toff =6 s)	10 min
F_v	Total	35 min

La Figura 3.4 muestra la estimación de la concentración del componente ligero de los platos de la columna de destilación con el observador difuso en condiciones iniciales distintas a las del sistema $x(0) \neq \hat{x}(0)$. La convergencia en el plato 1 se realiza en 6 min con un error máximo del 2.15%; la convergencia en el plato 3 se realiza en 0.6 min con un error máximo del 6.2%; la convergencia en el plato 7 se realiza en 0.5 min con un error máximo del 3.37%.

$$\hat{x}(0) = (0.86, 0.85, 0.84, 0.835, 0.83, 0.8, 0.76, 0.73, 0.65, 0.59, 0.25)$$

La Figura 3.5 muestra la estimación de la concentración con una perturbación en el plato 6 del observador difuso. La perturbación es un decremento en la concentración del plato durante 2 minutos, iniciando en el minuto 14 y terminando en el 16. El tiempo de convergencia del observador es de 50 seg con un error máximo del 0.266%

La Figura 3.6 muestra la estimación de la concentración de todos los platos de la columna de destilación realizando múltiples perturbaciones en el proceso, permitiendo observar el efecto que tiene la perturbación en los platos. La primer perturbación ocurre en el plato 8 en el minuto 10 del proceso durante 2 minutos, la segunda perturbación

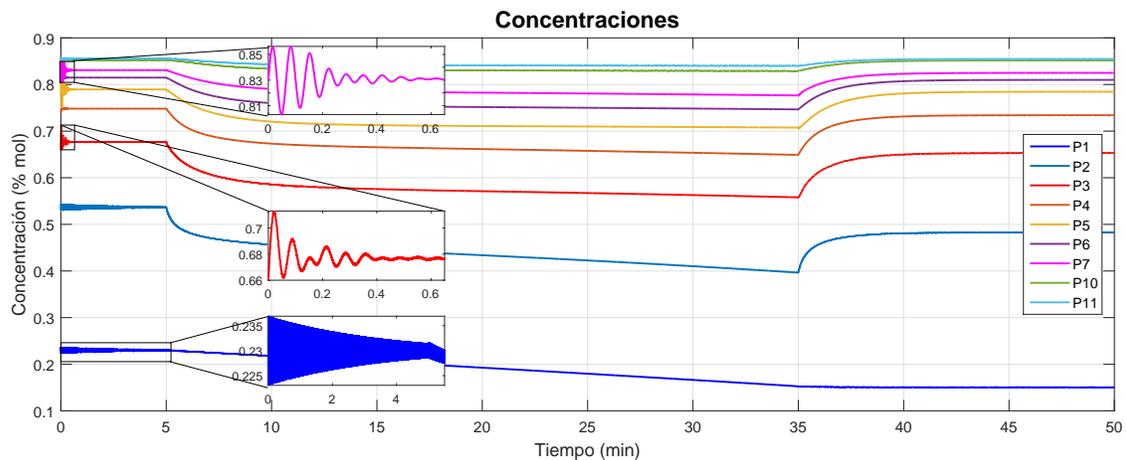


Figura 3.4: Estimación de la concentración del componente ligero del observador difuso con condiciones iniciales distintas, $x(0) \neq \hat{x}(0)$

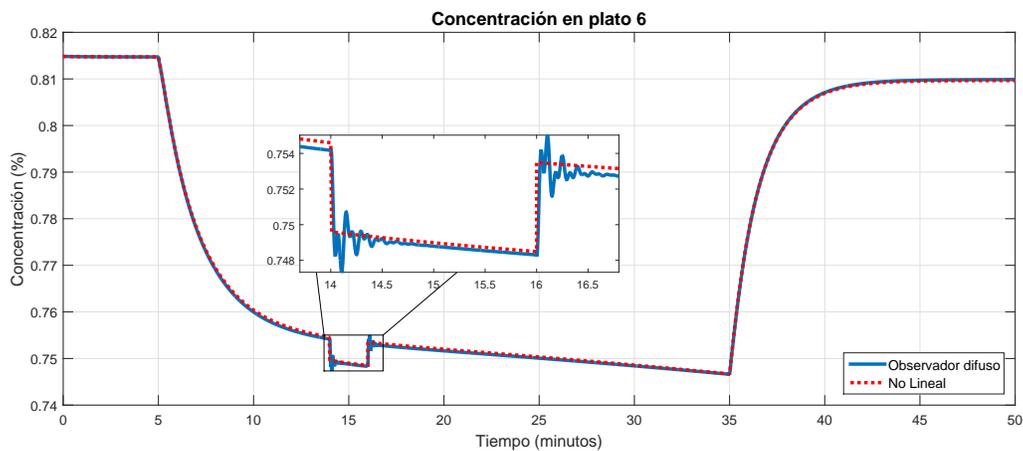


Figura 3.5: Estimación de la concentración con perturbación en el plato 6 del observador difuso

ocurre en el plato 6 al minuto 14 y por último una perturbación en el plato 4 al minuto 18. Las perturbaciones afectan la dinámica de los platos adyacentes de donde ocurre la perturbación.

3.4.4 Validación del observador difuso con modos deslizantes para columna de destilación en línea

La validación en línea del observador difuso con modos deslizantes se realiza mediante diversos experimentos llevados a cabo en la planta piloto de destilación EDF-1000, mostrada en la Figura 2.10. Los experimentos se realizan para una mezcla binaria de

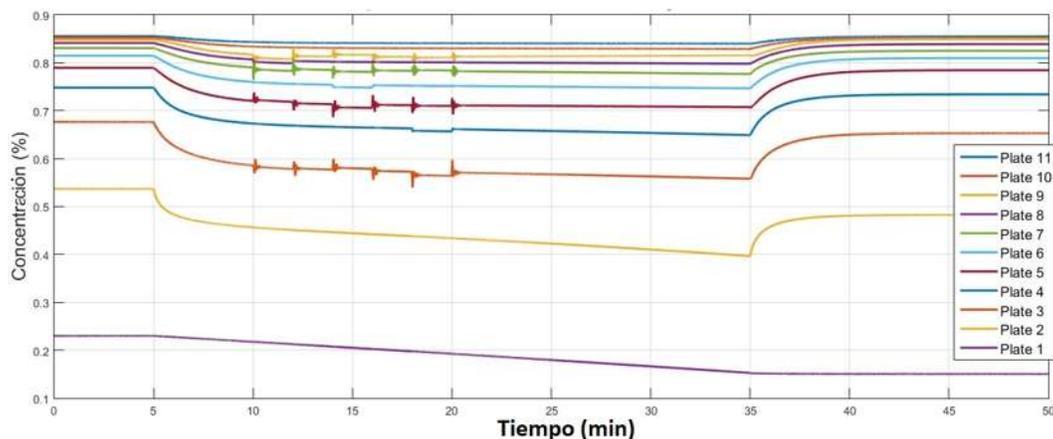


Figura 3.6: Estimación de la concentración con perturbación en los platos 4, 6 y 8 del observador difuso

Etanol-Agua, contemplando variaciones en las condiciones de las entradas (potencia calorífica y reflujo). Las características de la mezcla binaria se presentan en la Tabla 3.4 y en la Tabla 3.5 a la presión atmosférica de 615 mmHg.

Tabla 3.4: Parámetros de la mezcla para validación del observador difuso con modos deslizantes

Parámetro	Magnitud
Volumen de EtOH en el hervidor	1000 lt
Volumen de H2O en el hervidor	1000 lt
Presión total del proceso	615 mmHg

Tabla 3.5: Parámetros de los componentes de la mezcla para la validación del observador difuso con modos deslizantes

Parámetro	Etanol	Agua	Unidades
Densidad (ρ_i)	0.789	1	g/mol^3
Peso Molecular (W_i)	46.069	18.0528	g/mol
Temperatura de ebullición (T_{bi})	78.4	100	C°

La Figura 3.7 muestra el panel frontal de la interfaz realizada en LabVIEW para la validación en línea del observador difuso con modos deslizantes. La pestañas 1 y 3 son las gráficas de las estimaciones de concentración y temperatura respectivamente y la pestaña 2 es la gráfica del diagrama equilibrio líquido-vapor de la mezcla binaria que se destila a la presión seleccionada.

Las características de las entradas del proceso para cada experimento se muestran en la Tabla 3.6.

La Figura 3.8 muestra la estimación de la concentración en todos los platos de la columna de destilación con respecto a las entradas del proceso de la Tabla 3.6. En el minuto 50 del proceso se activa el reflujo y en la Figura 3.8 se muestra el decremento de la concentración en los platos debido al cambio de temperaturas de las fases líquido y vapor en cada plato.

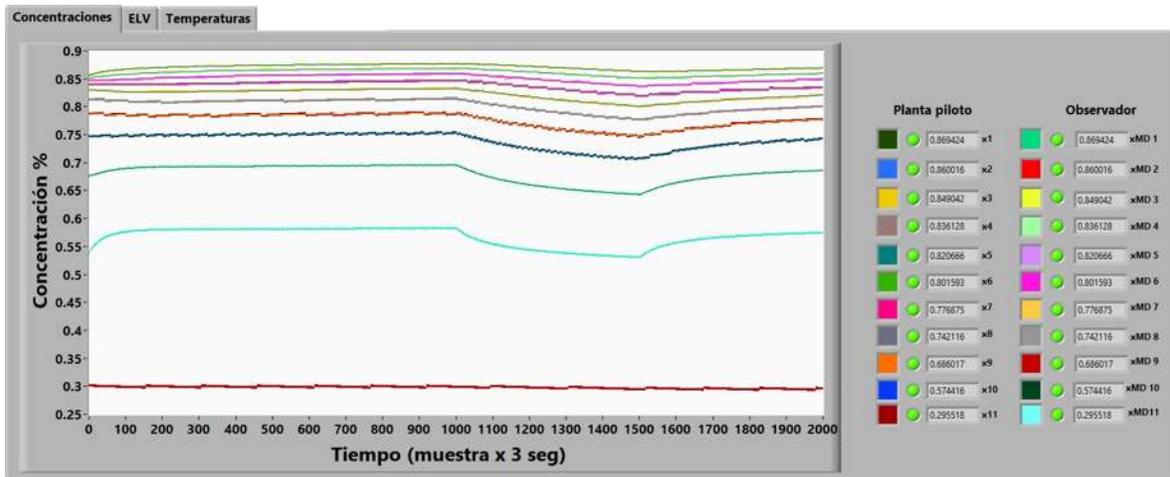


Figura 3.7: Panel frontal de la implementación del observador difuso con modos deslizantes

Tabla 3.6: Características de las entradas del proceso para validación de observador difuso

Entrada	Señal	Tiempo
Q_b	Escalón 0-450 Watts	0 min
F_v	Total	0 min
F_v	Pulso (ton = 6 s, toff =6 s)	50 min
F_v	Total	75 min

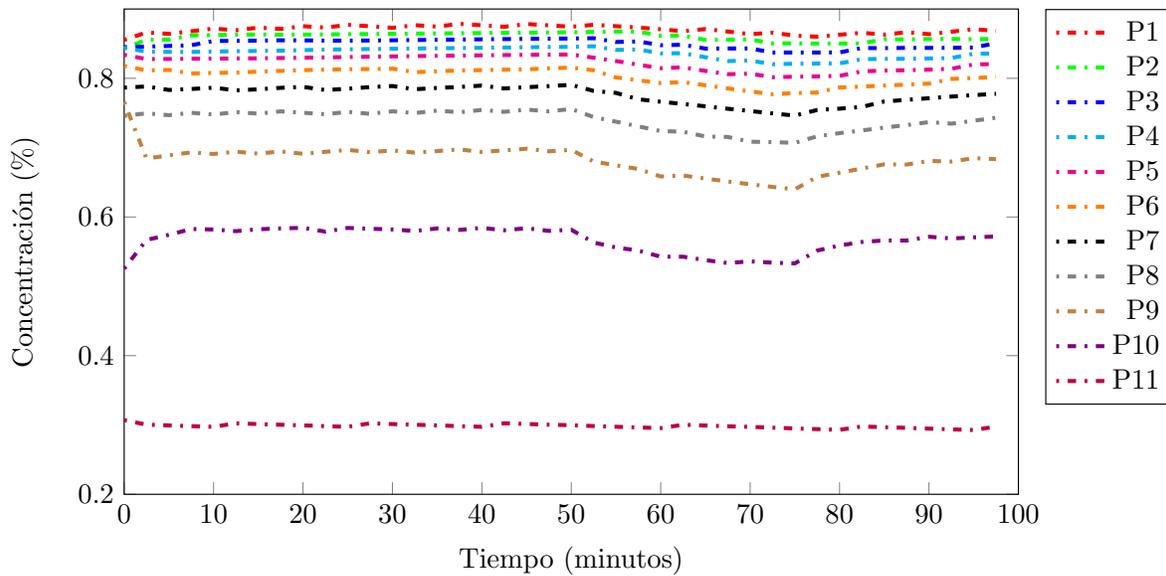


Figura 3.8: Estimación de concentración del observador difuso con modos deslizantes para la columna EDF-1000

La Figura 3.9 muestra las temperaturas de cada plato de la columna de destilación correspondientes a las concentraciones de la Figura 3.8. Las temperaturas en los platos de la columna de destilación aumentan debido a la temperatura del producto destilado que se reincorpora al cuerpo de la columna que sale del condensador.

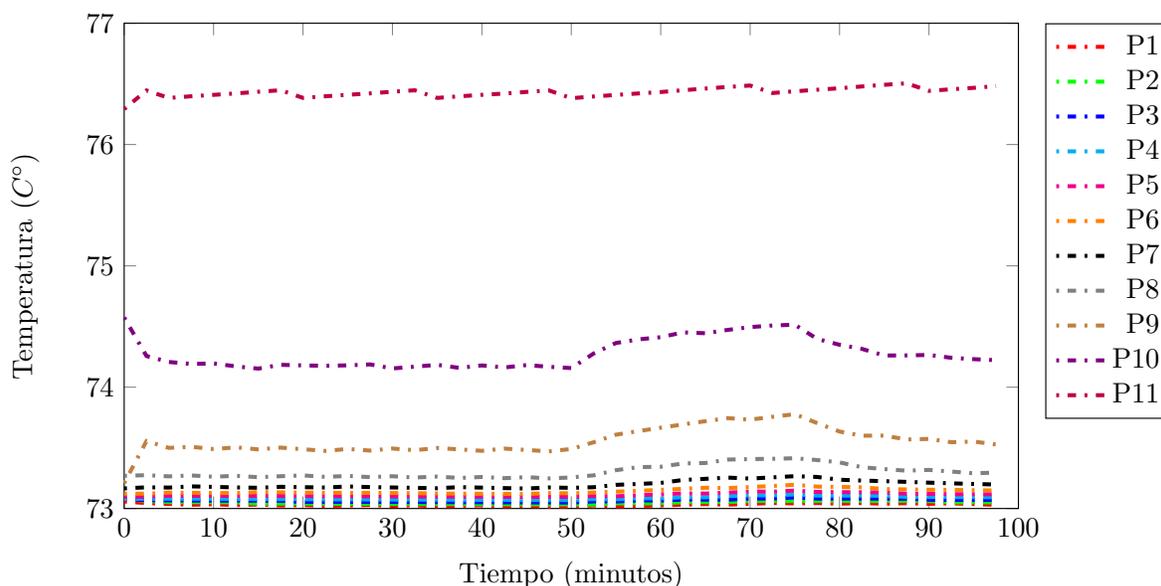


Figura 3.9: Estimación de temperatura del observador difuso con modos deslizantes para la columna EDF-1000

La Figura 3.10 muestra la convergencia de la estimación de la temperatura en los platos 11 y 10 de la columna de destilación con el observador difuso con modos deslizantes para condiciones distintas entre el observador y las temperaturas de los sensores de la columna. El tiempo de convergencia del observador varía en función del error de estimación inicial. En la Figura 3.10 se muestra que para un error de estimación inicial del 0.16% en el plato 10 el tiempo de convergencia es de 2.5 minutos, tomando en consideración que el tiempo de muestreo de los sensores es de 3 segundos por muestra.

En la Figura 3.11 se muestra la dinámica del observador en la estimación de la temperatura en los platos de la columna de destilación ante perturbaciones en la medición del sensor. En la Figura se muestra una falla aditiva en el sensor del hervidor durante 12 min y la convergencia en tiempo del observador es de 2.5 min.

La Figura 3.12 muestra la dinámica del observador ante múltiples perturbaciones en el sistema. Durante el caso de estudio se presentan fallas aditivas en los sensores de temperatura en el hervidor, plato 10 y condensador, mostrando la convergencia a la medición de cada sensor durante 2.5 min; de acuerdo a lo anterior es posible utilizar el observador difuso con modos deslizantes como generador de residuos para detectar fallas en los sensores de temperatura de la columna de destilación.

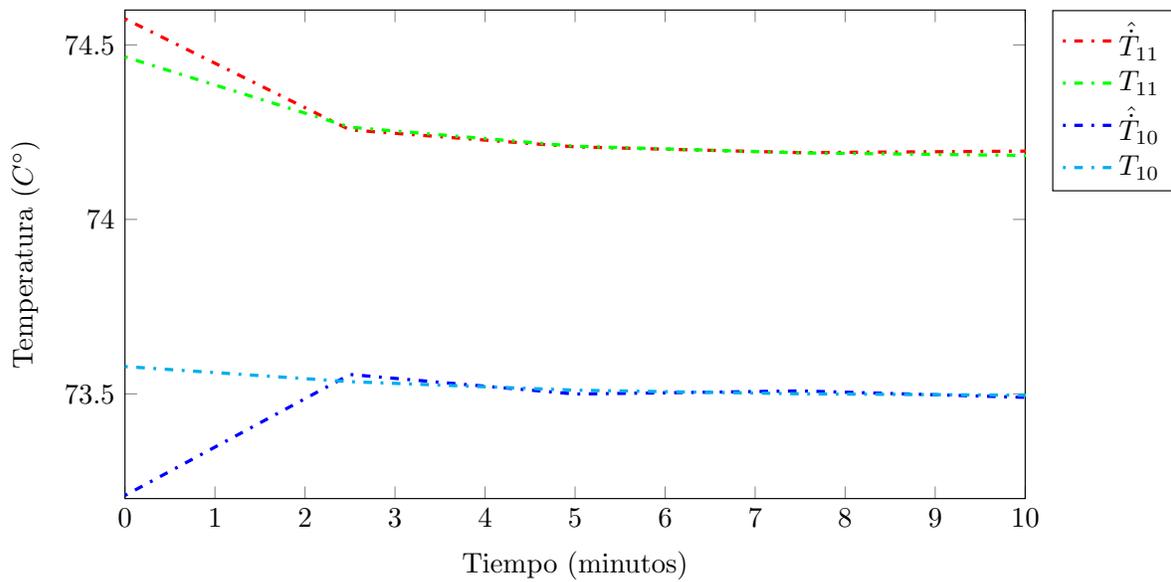


Figura 3.10: Estimación de temperatura del observador difuso con modos deslizantes con condiciones iniciales distintas, $\hat{T}_{11}(0) = 76.20^{\circ}C$, $T_{11}(0) = 76.41^{\circ}C$, $\hat{T}_{10}(0) = 74.57^{\circ}C$, $T_{10}(0) = 74.46^{\circ}C$

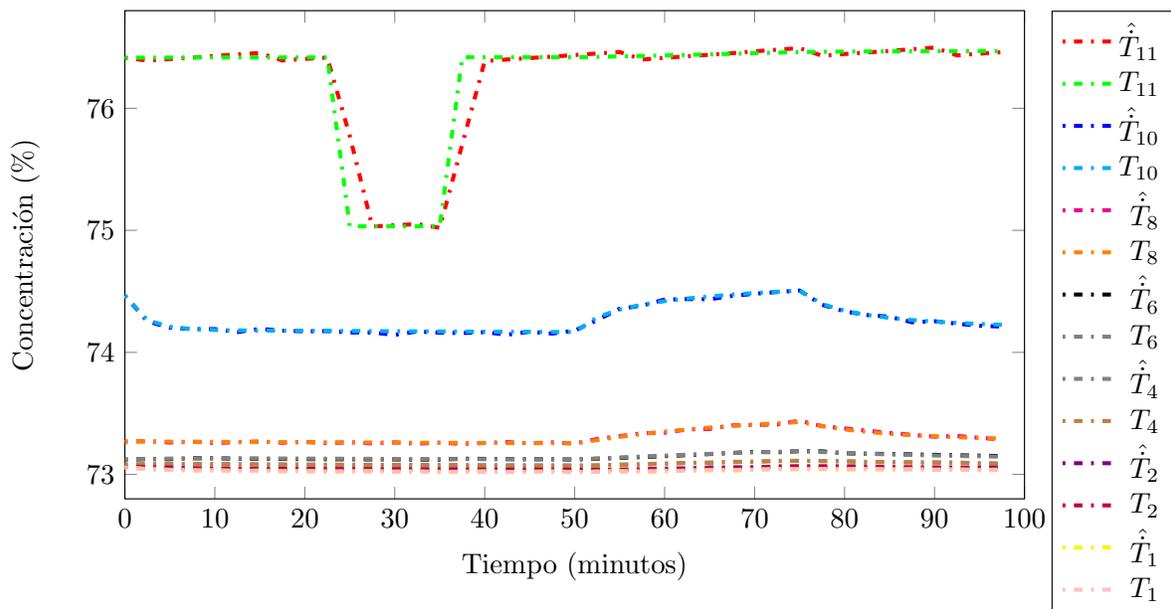


Figura 3.11: Estimación de temperatura del observador difuso con modos deslizantes para la columna EDF-1000 con perturbación en la medición de temperatura en el plato 11 (T_{11})

3.5 Observador difuso con modos deslizantes para actuador

De acuerdo al modelo difuso Takagi-Sugeno para el convertidor Buck-Boost del hervidor definido en (2.62), la expresión del observador difuso para dicho convertidor se

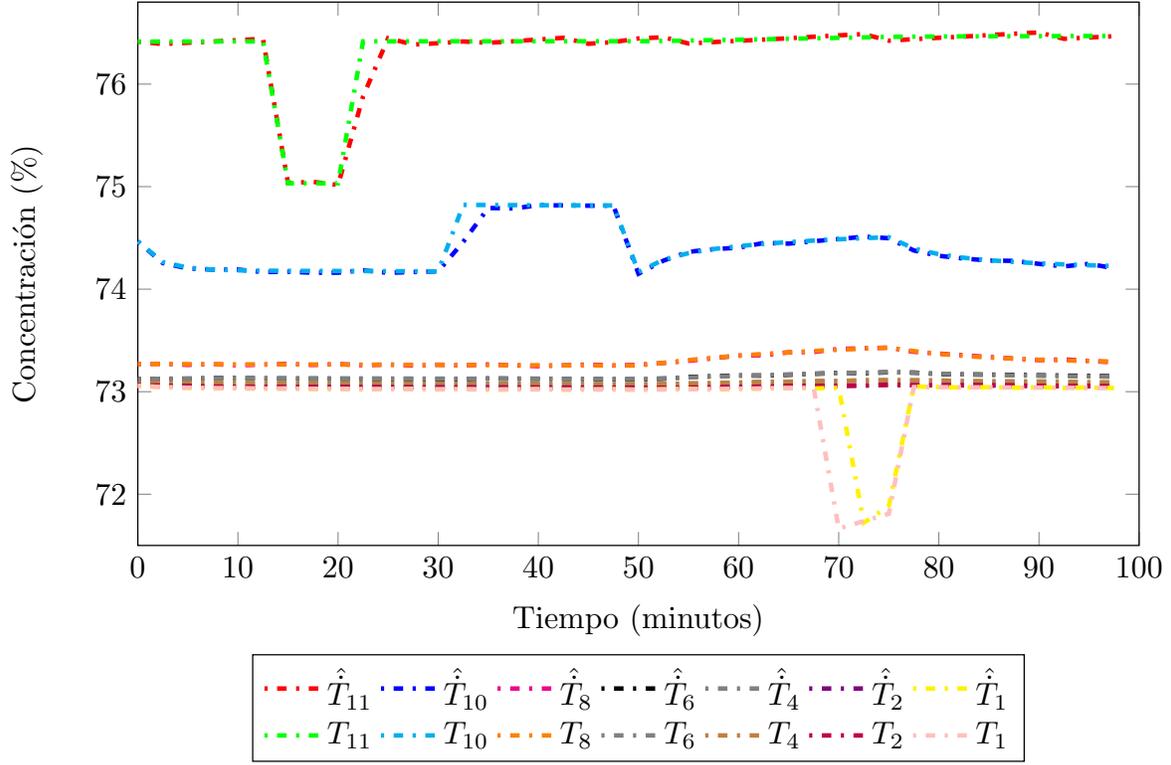


Figura 3.12: Estimación de temperatura del observador difuso con modos deslizantes para la columna EDF-1000

define en (3.40).

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= Ax(t) + (\sum_{i=1}^4 h_i(z_1, z_2) B_i) d \\ y(t) &= \sum_{i=1}^4 h_i(z_1, z_2) C_i x(t)\end{aligned}\quad (3.40)$$

la matriz de salidas C queda definida en (3.41), donde las salidas del sistema son v_C e i_L .

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\quad (3.41)$$

El error de estimación del observador se define por la diferencia de los estados de modelo no lineal del convertidor (\dot{x}) y los estados estimados del observador difuso con modos deslizantes ($\hat{\dot{x}}$) expresado en (3.42).

$$\tilde{e}_{\phi_a} = \dot{x} - \hat{\dot{x}}\quad (3.42)$$

El esquema a bloques del observador aplicado al convertidor Buck-Boost se muestra en Figura 3.13, donde las variables difusas (z_1, z_2) son los estados del sistema (x_1, x_2) , las ganancias del observador difuso y modos deslizantes se definen como K_f y K_ϕ .

De acuerdo a las características del modelo difuso del convertidor (2.62), donde las matrices de estados $A_1, A_2, A_3, A_4 = A$ son idénticas, el sistema de LMI's para

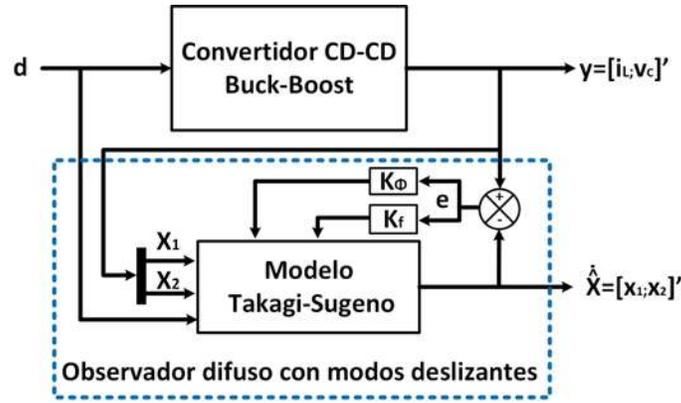


Figura 3.13: Observador difuso con modos deslizantes para convertidor CD-CD

garantizar la estabilidad del observador difuso con modos deslizantes para el convertidor Buck-Boost se define en (3.43).

$$\begin{aligned}
 P_{\phi_a} \phi > 0 \\
 A' P_{\phi_a} - C' N'_{\phi_a} + P_{\phi_a} A - N_{\phi_a} C < 0
 \end{aligned}
 \tag{3.43}$$

dada la solución para P_{ϕ_a} , la ganancia K_{ϕ} para el observador es determinada por (3.44)

$$K_{\phi} = P_{\phi_a}^{-1} N_{\phi_a}
 \tag{3.44}$$

3.5.1 Simulación de observadores para actuador

La simulación del observador se realiza para un convertidor Buck-Boost con las características de la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Parámetros del convertidor Buck-Boost

Parámetro	Magnitud
Voltaje de la fuente (V_{cc})	180V
Voltaje de salida (V_{out})	-229V
Inductor (L)	5 μ H
Capacitor (C)	78 μ F
Carga (R)	70.3 Ω
Frecuencia (f)	20 kHz
Ciclo de servicio (u)	0.56

En la Figura 3.14 se presenta la simulación en el transitorio de voltaje en el capacitor (v_C) con condiciones iniciales distintas del observador y del modelo no lineal ($v_C(0) = 0V, \hat{v}_C(0) = -250V$), donde se muestra la convergencia del observador (\hat{x}_2) en 600 μ s.

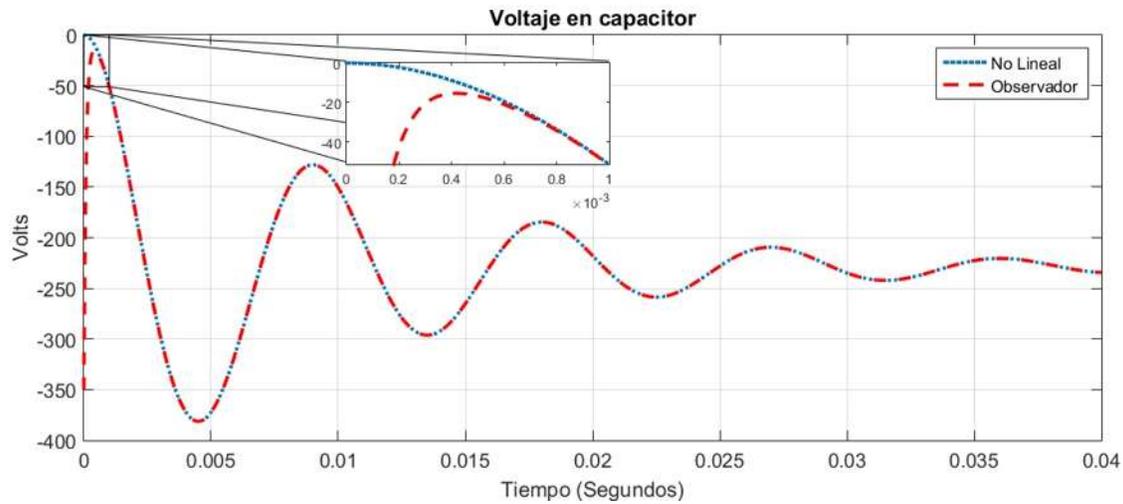


Figura 3.14: Transitorio de voltaje en v_C con condiciones distintas, $v_C(0) = 0$ V y $\dot{v}_C(0) = -250$ V

En la Figura 3.15 se presenta el transitorio en la corriente del inductor (i_L) con condiciones iniciales distintas entre el observador y el modelo no lineal ($i_L(0) = 0$ A y $\dot{i}_L(0) = 20$ A), donde se muestra la convergencia del observador en $800 \mu\text{s}$.

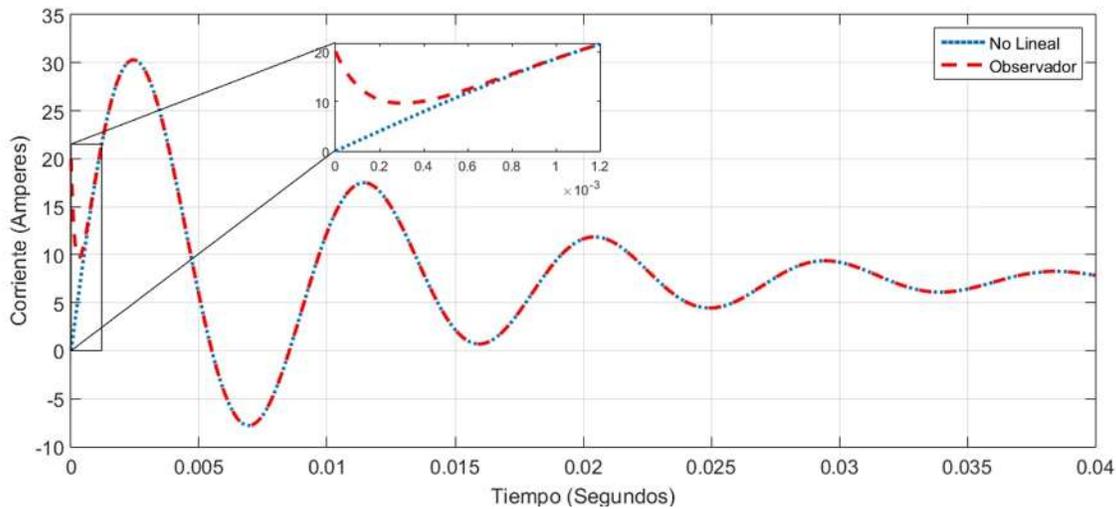


Figura 3.15: Transitorio de corriente en el inductor con condiciones iniciales distintas, ($i_L(0) = 0$ A, $\dot{i}_L(0) = 20$ A)

La Figura 3.16 muestra la convergencia del observador en el voltaje del capacitor v_C con perturbaciones en el voltaje nominal de entrada ($V_{in} = 180$ V). En la simulación del observador en 0.1 s el voltaje V_{in} se disminuye al 88.88 % ($V_{in} = 160$ V) de su valor nominal, en 0.2 s se aumenta al 111.11 % ($V_{in} = 200$ V), en ambos casos se muestra que el observador (\hat{v}_C) converge al voltaje del capacitor (v_C) del modelo no lineal ante estas perturbaciones. El observador presenta un error de estimación máximo de 1.3 V y mínimo de $100 \mu\text{V}$ debido al efecto del chattering de la superficie deslizante.

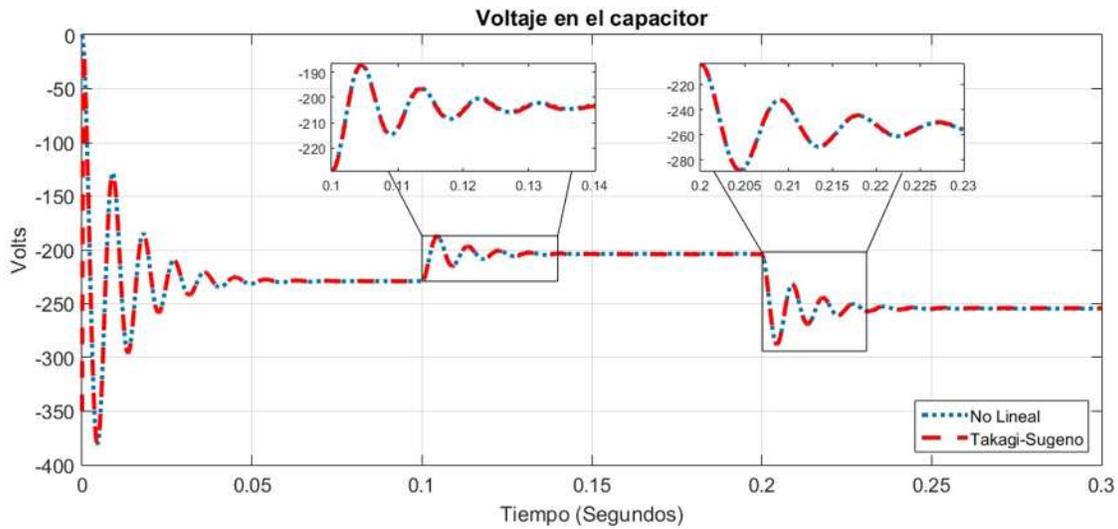


Figura 3.16: Respuesta del observador en el voltaje del v_C con perturbaciones en el voltaje de alimentación V_{in}

La Figura 3.17 muestra la convergencia del observador en la corriente del inductor i_L ante perturbaciones en el voltaje nominal de entrada ($V_{in} = 180V$). En 0.1 s se disminuye el voltaje V_{in} al 88.88 % $V_{in} = 160 V$ y en 0.2 s se aumenta al 111.11 % $V_{in} = 200 V$, en ambos casos se muestra que el observador (\hat{i}_L) converge a la corriente en el inductor (i_L) del modelo no lineal ante estas perturbaciones. El observador presenta un error de estimación máximo de 394 mA y mínimo de 80 μA .

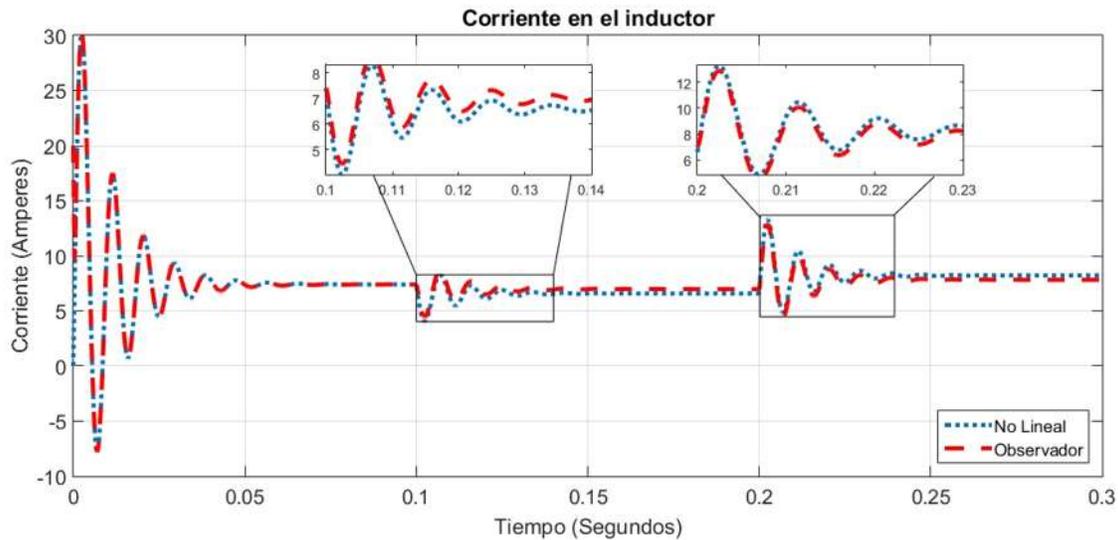


Figura 3.17: Respuesta del observador en la corriente del inductor i_L con perturbaciones en el voltaje de alimentación V_{in}

La Figura 3.18 muestra la convergencia del observador en el voltaje del capacitor realizando variaciones en la carga nominal ($R = 70.3\Omega$). En 0.1 s se disminuye la carga

al 78.23 % ($R = 55\Omega$) y en 0.2 s se aumenta al 113.79 % ($R = 80\Omega$), en ambos casos se muestra que el observador (\hat{i}_L) converge al voltaje del capacitor (v_C) del modelo no lineal. El observador presenta un error máximo de 1 V y mínimo de $75 \mu\text{V}$.

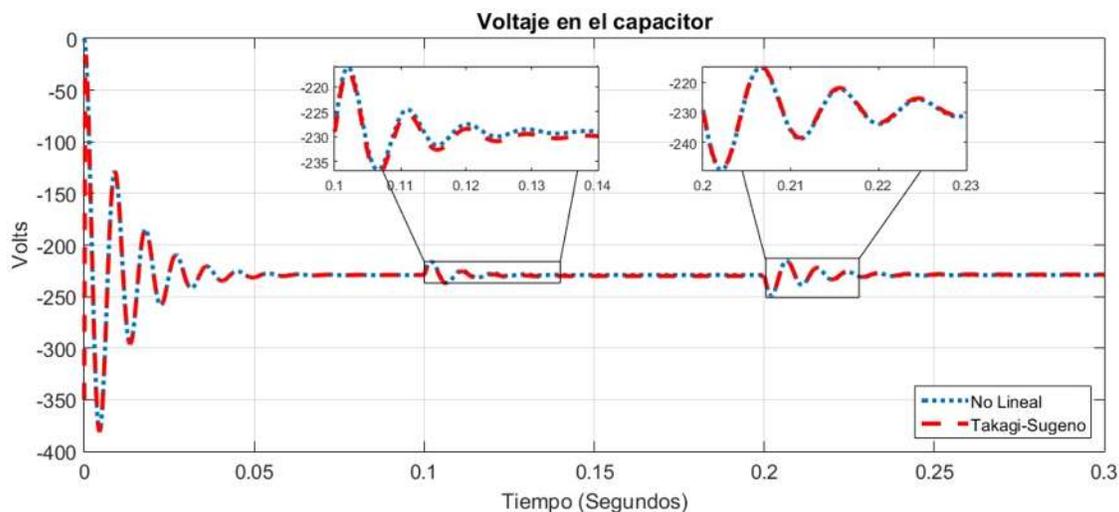


Figura 3.18: Respuesta del observador en el voltaje del v_C con variaciones en la carga R

La Figura 3.19 muestra la convergencia del observador en la corriente del inductor i_L realizando variaciones en la magnitud nominal de la carga ($R = 70.3\Omega$). En 0.1 s se disminuye la carga al 78.23 % ($R = 55\Omega$) y en 0.2 s se aumenta al 113.79 % ($R = 80\Omega$), en ambos casos se muestra que el observador converge a la corriente del inductor. El observador presenta un error máximo de 13 mA y mínimo de $100\mu\text{A}$.

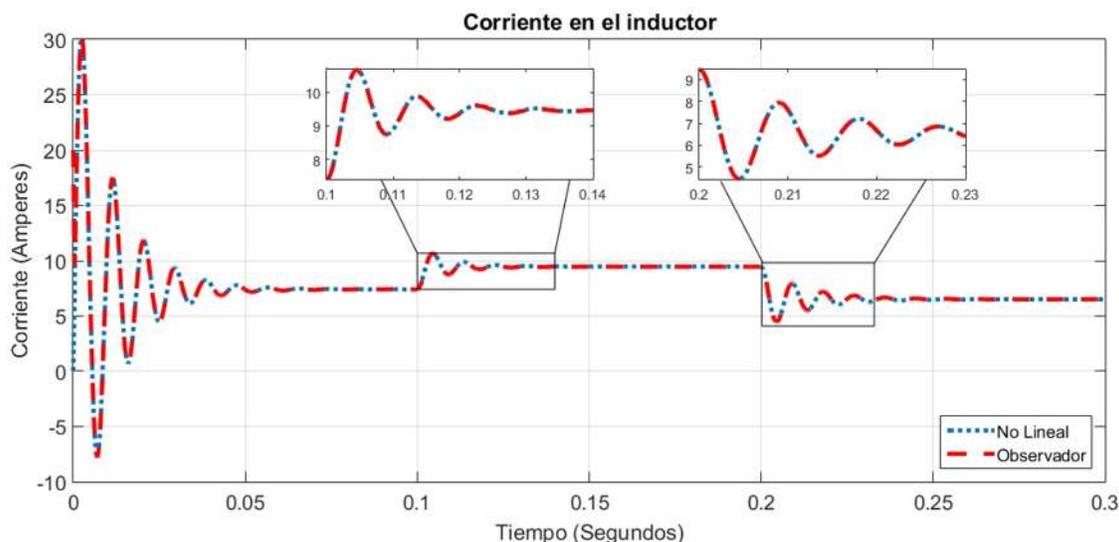


Figura 3.19: Respuesta del observador en la corriente del inductor i_L con variaciones en carga R

De acuerdo a los resultados de la simulación del observador difuso con modos desli-zantes para el actuador y la validación experimental para la columna de destilación se

comprueba que el observador difuso con modos deslizantes cumple con las características necesarias de convergencia y robustez ante perturbaciones para diseñar e implementar sistemas de detección y diagnóstico de fallas con redundancia analítica.

3.6 Conclusiones

En esta sección se presenta el análisis, simulación y validación experimental de observadores difusos aplicados a la columna de destilación, con la finalidad de estimar la fracción molar del componente ligero y las temperaturas en todos los platos de la columna de destilación, tomando como entradas a la potencia calórica y activación de la válvula de reflujo y como salidas medidas a las temperaturas de los sensores en los platos 1, 2, 4, 6, 8, 10 y 11. En la validación experimental se realizan fallas en la medición de los sensores para analizar la convergencia y robustez ante fallas aditivas al proceso.

Además se presenta el diseño y simulación de un observador difuso con modos deslizantes aplicado a un convertidor CD-CD y se analiza su convergencia y fiabilidad en estado transitorio y estable con condiciones iniciales distintas y ante variaciones paramétricas en el voltaje de alimentación y en la carga.

CAPÍTULO 4

CONTROL TOLERANTE A FALLAS PARA COLUMNA DE DESTILACIÓN

La automatización de un proceso se compone principalmente por sensores, que realizan la medición de la variable física (datos) del proceso; actuadores que modifican las variables de la planta para cambiar su comportamiento y por el sistema de control que utiliza la información del sensor, la procesa y ordena a los actuadores ejecutar una acción.

Debido al número de elementos que conforman la automatización los procesos la susceptibilidad a que ocurra una falla aumenta. Una detección de fallas confiable, oportuna y eficiente puede prevenir riesgos tanto para el proceso como para el usuario, por lo que las técnicas de control y de detección de fallas cada vez son más indispensables.

Una **falla** es una desviación de al menos una propiedad característica del sistema con respecto a sus condiciones usuales y estándar de operación; una **avería** corresponde a la interrupción permanente de la capacidad del sistema para cumplir una función requerida en condiciones específicas [Verde et al., 2013]. Las **perturbaciones** son acciones externas que afectan el desempeño de sistema y suelen ser representadas como señales de entradas desconocidas que se añaden a la salida del sistema [Blanke et al., 2001] [Banda Urbina, 2016].

Las fallas se pueden clasificar por su efecto en la planta [Téllez, 2010] como:

- **Fallas de medición aditivas:** Son discrepancias entre los valores reales y medidos de las entradas y salidas de la planta.
- **Fallas de proceso aditivas:** Son perturbaciones (entradas no medidas) actuando

sobre la planta, las cuales causan una desviación en las salidas independientes.

- **Fallas de proceso multiplicativas:** Son cambios (graduales o abruptos) en los parámetros de la planta.

Las fallas también se clasifican por su ubicación en la planta:

- **Falla en sensores**
- **Falla en actuador**
- **Falla en componente**

La clasificación de las fallas [Verde et al., 2013] de acuerdo a su dependencia temporal es:

- **Falla abrupta:** se manifiesta como un cambio repentino, se modela como una señal tipo escalón.
- **Falla incipiente:** se manifiesta como un cambio en magnitud de las variables del sistema y que va aumentando paulativamente, se modela como una señal rampa.
- **Falla intermitente:** se presenta de manera aleatoria y desaparece de la misma forma.

De acuerdo a lo anterior, los sistemas de control automático son susceptibles a fallas que a su vez pueden verse amplificadas debido al lazo de control provocando un mal funcionamiento. Además, los lazos de control pueden ocultar la falla evitando que sean observadas hasta provocar una avería irreparable que obligue a detener al sistema o proceso [Puig et al., 2010], de ahí la importancia de implementar sistemas de control que permitan operar de forma aceptable incluso durante una falla y con la capacidad de parar el proceso cuando se originen daños irreparables. El control tolerante a fallas proporciona una alternativa para la reconfiguración o adaptación del sistema de control ante la presencia de fallas mientras sea posible. El grado de tolerancia a fallas necesario dependerá de la aplicación; existen sistemas más críticos que exigirán tolerancia completa, algunos otros podrán conformarse con una degradación aceptable.

Los sistemas de control tolerante a fallas son clasificados en dos grupos:

- **Pasivo:** basados en teoría de control robusto, utilizan la propiedad que tienen los sistemas realimentados de hacer frente a ciertas perturbaciones y ser inmunes a determinadas fallas [Patton, 1997]. Sin embargo sólo existen controladores robustos para una clase reducida de cambios en la dinámica del sistema provocados por las fallas, por lo que la capacidad de tolerar fallas es limitada, además las fallas en actuadores no pueden ser manejadas [Patton, 1997] [Castro, 2013].

- **Activo:** consisten en el diagnóstico en línea de la falla, es decir, en determinar el componente averiado, el tipo, su tamaño e instante de aparición y a partir de dicha información, activar algún mecanismo de acomodación de la falla o de reconfiguración del controlador o incluso dependiendo de la gravedad, la detención definitiva del sistema. Este enfoque exige disponer de un sistema de diagnóstico de fallas que, en tiempo real pueda dar información a un sistema supervisor para que active alguno de los mecanismos de acción tolerante [Blanke et al., 2016].

El control tolerante a fallas activo tiene dos enfoques: **adaptación**, que mantiene la estructura del controlador y modifica sólo los parámetros; **reconfiguración** cambia las entradas y salidas del controlador así como reajusta la ley de control [Goupil, 2009]. La implementación de cada enfoque depende de las características del sistema.

De manera general un control tolerante a fallas activo está compuesto por dos partes [Blanke et al., 2016]:

- * **Diagnóstico de Fallas:** se detecta e identifica la existencia de fallas.
- * **Rediseño de Control:** el controlador se adapta a la situación de falla con la finalidad de que el sistema siga operando.

El diagnóstico de fallas se divide en tres etapas según la profundidad [Puig et al., 2004]:

- * **Detección de falla:** decisión de si existe o no una falla, así como la determinación del instante de aparición.
- * **Aislamiento de falla:** localización del componente en donde se produjo la falla.
- * **Identificación y estimación de falla:** Identificación del modo de fallas y estimación de su magnitud.

Un sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas (FDI), es un sistema que detecta y ubica la fuente de la falla cuando esta ocurre en un actuador o sensor del sistema. Esta información permite realizar el mecanismo para inicializar la reconfiguración del control, que deberá de tratar de adaptar la falla para proveer la estabilidad necesaria y mantener el nivel deseado de rendimiento.

Una característica importante de los sistemas es la redundancia, la cual ayuda a determinar la existencia de fallas en los sensores y actuadores del sistema. La redundancia se puede clasificar en dos tipos, física (directa) y analítica. La redundancia física está basada en hardware o redundancia material, en la cual se instalan múltiples sensores o actuadores del proceso para obtener la información adicional de una variable en particular y así poder comparar y discernir entre las condiciones reales de la operación. En términos de sensores, dos o tres sensores colocados en la misma ubicación para realizar la misma medición es llamada doble y triple redundancia. En operaciones

normales es suficiente un sólo sensor, aunque a veces son necesarios dos o tres sensores para asegurar que este elemento falla. También se pueden colocar múltiples sensores y actuadores en paralelo, por si alguno de ellos falla pueda ser sustituido de manera inmediata. La desventaja de esta redundancia es el costo de los sensores o actuadores adicionales al proceso, además de que en algunos procesos el espacio es reducido para colocar componentes adicionales. También está el costo por el mantenimiento, por lo que actualmente se prefiere obtener información redundante a través de algoritmos que permitan conocer y diagnosticar el estado de los elementos/componentes del sistema. La redundancia analítica se basa principalmente en algoritmos, modelos matemáticos u observadores que proveen información mediante la estimación de la señales de interés y pueden estar corriendo desde una computadora; la mayor ventaja de la redundancia analítica es que no requiere de instrumentación adicional para realizar la detección de fallas.

El esquema a bloques de un sistema FDI basado en redundancia analítica se muestra en la Figura 4.1, donde la secuencia para detectar la existencia de falla comienza con las señales indicadoras de fallas, llamadas **residuos**, que se obtienen comparando las mediciones de las entradas y salidas reales del sistema con las del modelo, al evaluar los residuos se obtienen los **síntomas**, a la etapa de interpretación de los residuos se le denomina **detección**. La **localización** consiste en agrupar los síntomas para determinar el conjunto de componentes físicos de operación anormal al proceso. La **identificación** de la fallas se obtiene al determinar qué elemento está fallando y cómo se manifiesta [Verde et al., 2013]. En este trabajo de tesis se presenta un control tolerante a fallas activo para el actuador de una columna de destilación formado por un sistema de diagnóstico y detección de fallas y una reconfiguración en el ciclo de servicio del convertidor CD-CD que permita regular la potencia calórica en un hervidor.

4.1 Controlador por compensación distribuida paralelo

El control por compensación distribuida en paralelo (PDC) ofrece un procedimiento para diseñar un controlador difuso a partir de un modelo difuso Takagi-Sugeno. Para realizar la PDC, el objeto a controlar (sistema no lineal) primero es representado por su modelo difuso Takagi-Sugeno ya que el controlador PDC comparte los mismos conjuntos difusos en la parte de la premisa.

La idea general del controlador por compensación distribuida paralelo descrita por [Wang et al., 1995] se basa en el diseño de compensadores para cada regla de un modelo difuso Takagi-Sugeno del tipo:

SI $e_1(t)$ es M_1 y, ... , y $e_p(t)$ es M_p ,

Entonces $u_i(t) = -F_i x(t)$

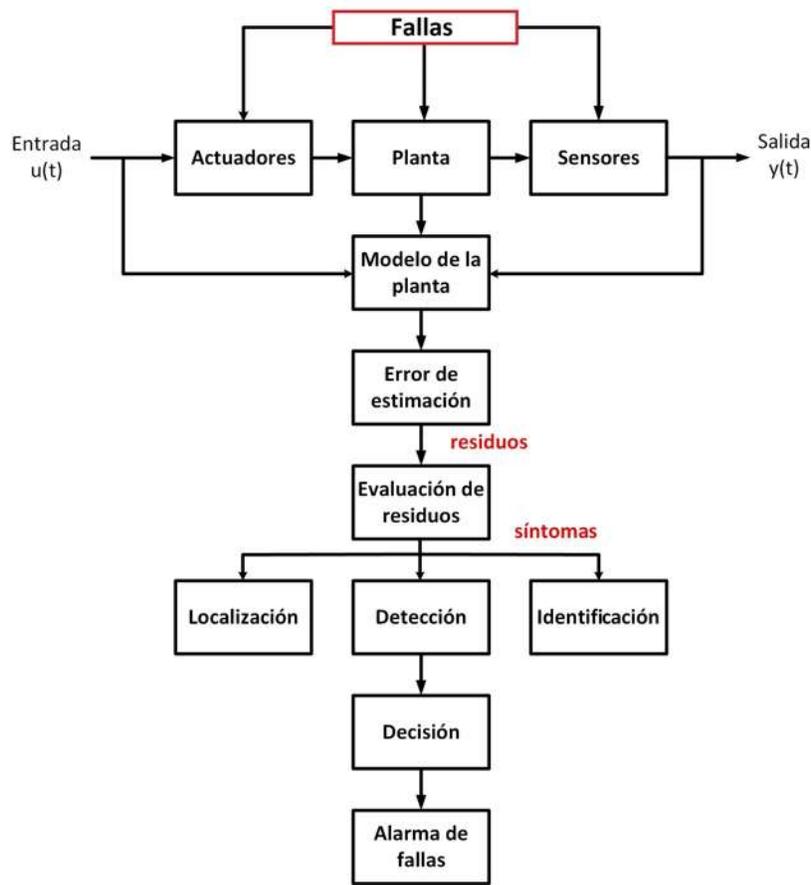


Figura 4.1: Esquema a bloques de las etapas de un sistema FDI

donde $i = 1, 2 \dots r$ es el número de reglas del modelo difuso. Las reglas de control difuso tienen un controlador lineal (retroalimentación de estado) en la parte consecuente.

El controlador difuso completo es determinado en (4.1).

$$u(t) = -\frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))(F_i x(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = -\sum_{i=1}^r h_i(z(t))F_i x(t) \quad (4.1)$$

Por lo tanto el diseño del controlador difuso consiste en determinar las ganancias locales de retroalimentación F_i en la parte consecuente. El control PDC proporciona un procedimiento simple y natural para el manejo de sistemas no lineales.

Teorema: El punto de equilibrio de un sistema difuso es global y asintóticamente estable si existe una matriz común P definida positiva, tal que:

$$\{A_i - B_i F_j\}^T P \{A_i - B_i F_j\} - P < 0 \quad (4.2)$$

para cada $i, j = 1, 2, \dots, r$.

Este teorema se reduce al teorema de estabilidad de Lyapunov para sistemas lineales cuando $r = 1$. La condición de estabilidad del teorema se deriva de una función cuadrática del tipo (4.3).

$$v(x(t)) = x(t)^T P x(t) \quad (4.3)$$

por lo tanto para determinar la estabilidad del sistema difuso se reduce a encontrar $P > 0$ común, el cual puede ser resuelto eficientemente mediante las técnicas de optimización para LMI con herramientas matemáticas.

4.2 Metodología de diseño de controlador y observador difuso basados en LMI's

La metodología de diseño de observador-controlador para sistemas difusos Takagi-Sugeno en [Tanaka et al., 1998] mediante LMI's, define a la ley de control por la expresión (4.4)

$$u(t) = -\frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))(F_i \hat{x}(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = -\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) F_i \hat{x}(t) \quad (4.4)$$

donde \hat{x} son los estados estimados por el observador difuso. Por lo tanto el sistema de control difuso con observador es expresado en

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) [A_i \hat{x}(t) + B_i u(t) + K_i (y(t) - \hat{y}(t))] \\ u(t) &= -\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) F_i \hat{x}(t) \end{aligned} \quad (4.5)$$

la estabilidad del sistema puede ser determinada mediante la solución de un sistema de LMI's basadas en una función cuadrática de Lyapunov, tal que.

$$\begin{aligned} &P_1, P_2 > 0 \\ &P_1 A_i^T - M_i^T B_i^T + A_i P_1 - B_i M_i < 0 \\ &A_i^T P_2 - C_i^T N_i^T + P_2 A_i - N_i C_i < 0 \\ P_1 A_i^T - M_j^T B_j^T + A_i P_1 - B_i M_j + P_1 A_j^T - M_i^T B_j^T + A_j P_1 - B_j M_i < 0 \\ &A_i^T P_2 - C_j^T N_i^T + P_2 A_i - N_i C_j + P_2 A_j^T - C_i^T N_j^T + P_2 A_j - N_j C_i < 0 \\ & \quad \quad \quad i < j \end{aligned} \quad (4.6)$$

donde $M_i = F_1 P_1$, $N_i = P_2 K_i$.

Las matrices P_1 , P_2 , M_i y N_i pueden determinarse usando sistemas o plataformas de solución u optimización de LMI's, como Matlab.

Las ganancias del control se determinan en (4.7)

$$F_i = M_i P_1^{-1} \quad (4.7)$$

Las ganancias del observador se determinan en (4.8)

$$K_i = P_2^{-1}N_i \quad (4.8)$$

4.3 Esquema general de sistema de diagnóstico y detección de fallas para la columna de destilación EDF-1000 y control tolerante a fallas para su actuador

El objetivo del control tolerante a fallas presentado en esta tesis es regular la potencia calórica en el hervidor de la columna de destilación para mejorar la seguridad del proceso, realizar el monitoreo y detección de fallas de los sensores de temperatura, así como detectar las fallas en el actuador por el voltaje de alimentación o deterioro de la resistencia calefactora.

El esquema general del sistema de detección y aislamiento de fallas de la planta piloto de destilación y el control tolerante a fallas en su actuador se muestra en en la Figura 4.2.

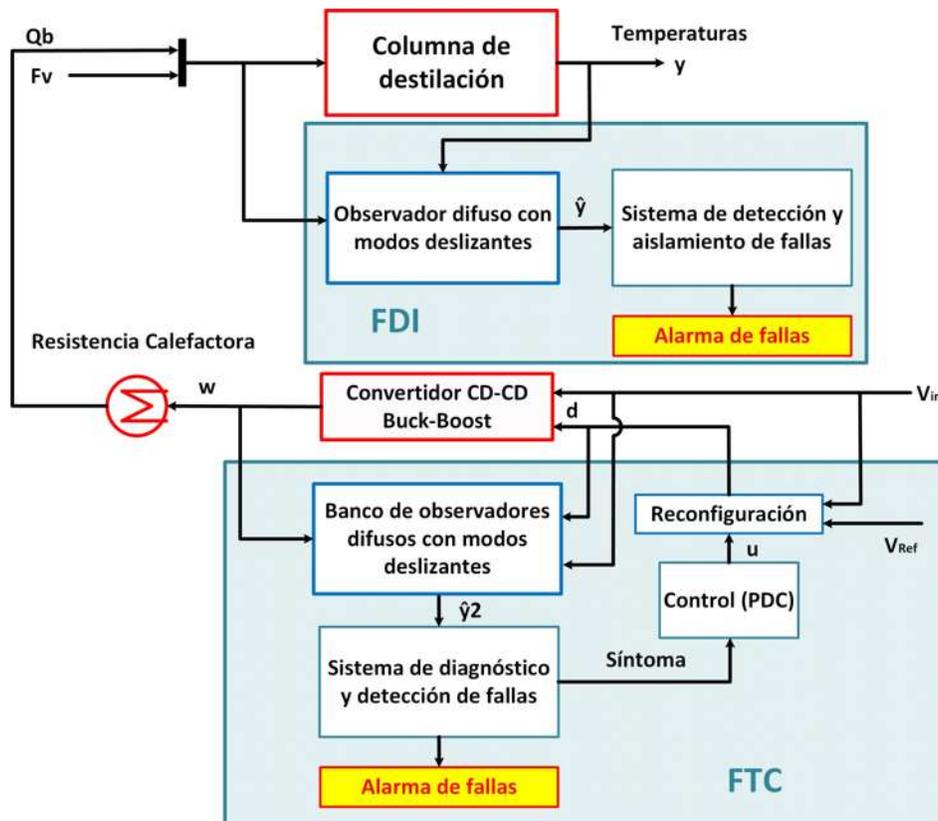


Figura 4.2: Esquema de detección y aislamiento de fallas en sensores de columna de destilación y control tolerante a fallas para el actuador

La etapa del sistema FDI se aplica en los sensores de temperatura (y) de la columna de destilación que tiene como entradas (u) a la potencia calórica (Q_b) y al reflujo (F_v). El sistema FDI está compuesto por un observador difuso con modos deslizantes que estima la concentración del componente ligero (x_i) y las temperaturas de cada plato de la columna (\hat{y}), además de generar los residuos con base en el error de estimación (e), se evalúan los residuos para determinar si existe o no la falla e indicar el o los sensores con falla mediante una alarma. Se determina falla total del proceso cuando tres o más sensores fallan a la vez y por lo tanto se envía una señal de paro de proceso hacia la ley de control.

El sistema FDD se aplica a un convertidor Buck-Boost que regula la potencia eléctrica (w) en una resistencia calefactora mediante el ciclo de trabajo (d). El sistema FDD está compuesto por dos observadores difusos con modos deslizantes que estiman el voltaje de salida del convertidor (v_C) y la corriente en el inductor (i_L). Con los errores de estimación de cada observador se generan los residuos \hat{h}_1 y \hat{h}_2 , respectivamente, que determinan los síntomas para indicar la existencia de falla o no.

La tolerancia a fallas para el convertidor se realiza mediante un controlador de compensación paralela distribuida (PDC) basado en la diferencia de los estados estimados por los observadores y del setpoint permitiendo adaptar el ciclo del servicio (d).

4.4 Sistema de detección y aislamiento de fallas para sensores de temperatura

El esquema a bloques del sistema de detección y aislamiento de fallas para los sensores de temperatura de la planta piloto se muestra en la Figura 4.3. El sistema FDI se diseña a partir de un observador difuso con modos deslizantes como generador de residuos.

De acuerdo al observador difuso con modos deslizantes presentado en (3.37) y a las temperaturas medidas (T_i) en los platos de la columna de destilación, la generación de residuos es determinada por la expresión (4.9).

$$r_i = T_i - \hat{T}_i \quad (4.9)$$

donde \hat{T}_i es la temperatura estimada por el observador para cada plato de la columna de destilación.

En el caso ideal, un residuo es igual a cero cuando no ocurre una falla ($r = 0$) y diferente a 0 cuando existe una falla ($r \neq 0$), por lo tanto la evaluación del residuo consiste en determinar únicamente cuando el residuo es igual a cero o no [Ortiz-Torres et al., 2016]. Debido a las no linealidades de los sistemas físicos y a los errores de estimación que se pudieran tener con el observador, es necesario implementar otra técnica de evaluación de residuos.

En [Bask, 2005] se propone comparar un umbral con una señal de evaluación, que es

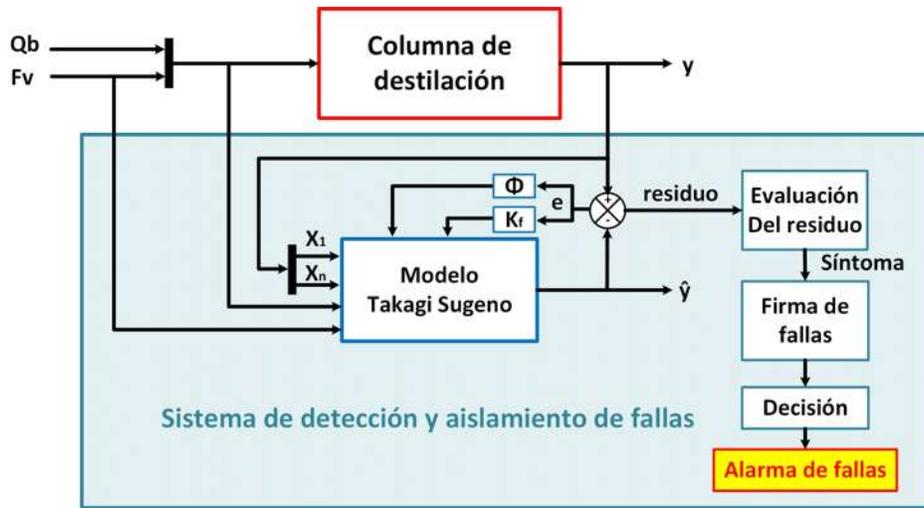


Figura 4.3: Esquema de detección y aislamiento de fallas en sensores de columna de destilación.

una función del residuo. La señal de evaluación $\Gamma(t)$ se elige de tal manera que ponga en manifiesto la contribución de las fallas por el error de estimación. El umbral $\Phi(t)$ se determina, tal que:

$$\begin{cases} \Gamma(t) \leq \Phi(t) & \forall t \geq 0 & \Rightarrow \text{Libre de falla} \\ \Gamma(t) > \Phi(t) & \forall t \geq 0 & \Rightarrow \text{Falla (alarma)} \end{cases} \quad (4.10)$$

Si ocurre una falla en algún sensor de la columna, la estimación de la concentración y temperatura de ese estado y de sus adyacentes se afectarán de acuerdo a la magnitud o gravedad de la falla.

4.4.1 Validación experimental del sistema FDI en planta piloto EDF-1000

La validación experimental del sistema FDI se realiza con procesos en la planta piloto de destilación EDF-1000 para una mezcla binaria de Etanol-Agua con los parámetros de las Tabla 3.4 para la mezcla, y en la Tabla 3.5 para las propiedades de los componentes de la mezcla y por 3.6 de las señales de entrada.

La estación de monitoreo se diseña en LabVIEW con la finalidad de monitorear y visualizar las variables del sistema (temperaturas reales y estimadas, concentración del componente ligero, voltaje y corriente en la resistencia calefactora, voltaje de alimentación y corriente en el inductor del convertidor, residuos y alarmas de sistema FDI) en un proceso en línea.

La estación de monitoreo cuenta con 6 ventanas en el panel frontal:

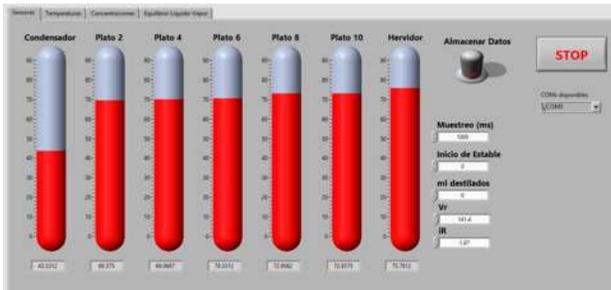
- **Sensores:** Los sensores de temperatura ubicados en los platos 1, 2, 4, 6, 8, 10 y 11, se comunican con la estación de monitoreo por SPI a través de los módulos MAX31865. La ventana se muestra en la Figura 4.4(a) y permite configurar la comunicación con los módulos, visualizar la temperatura de los sensores y almacenar en Excel® los datos del proceso (temperaturas, concentraciones, potencia eléctrica y porcentaje de apertura de la válvula de reflujo).
- **Equilibrio Líquido-Vapor:** En la ventana de la Figura 4.4(b) se grafica el diagrama equilibrio líquido-vapor de la mezcla binaria a destilar en la presión seleccionada.
- **Temperaturas:** En la ventana de la Figura 4.4(c) se grafican las temperaturas de los sensores y de la estimación de temperaturas del observador, con la finalidad de visualizar la convergencia del observador en un proceso en línea.
- **Concentraciones:** La estación de monitoreo grafica la concentración estimada por el observador con respecto a las entradas y salidas del proceso real, Figura 4.4(d).
- **Residuos:** Se grafican los residuos generados por el observador en la Figura 4.4(e) para visualizar la existencia de falla en algún sensor de la columna de destilación.
- **Alarmas:** En la ventana de alarmas mostrada en la Figura 4.4(f) se presentan los leds indicadores de las alarmas en caso de falla en cada sensor, además se indica el estado en que se encuentra el proceso, ya sea en modo seguro, modo con falla o alarma de paro de proceso.

De acuerdo a la magnitud de los residuos generados por el observador en cada estado, se clasifica la gravedad de la falla en dos formas, *descalibración de sensor* cuando el sensor presenta error de medición en un intervalo de $|\pm 0.5C^\circ|$ a $|\pm 2C^\circ|$ y para *falla de sensor* cuando el error de medición es $> |\pm 2C^\circ|$.

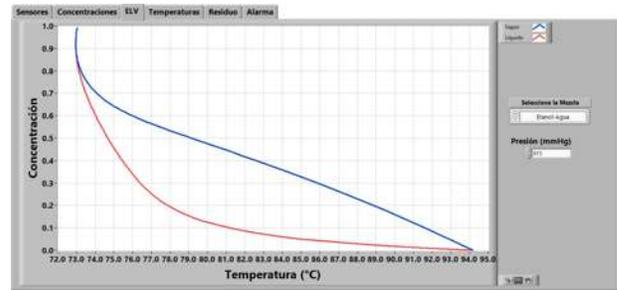
En la Tabla 4.1 se presentan las firmas de falla generadas por la evaluación de los residuos, donde las columnas representan las señales de evaluación y las filas son el o los sensores S_{ij} de la columna de destilación que pueden presentar falla. Donde i es el número de sensor y j el tipo de falla en el sensor; con $j = 1$ para descalibración y $j = 2$, para falla de sensor.

Tabla 4.1: Matriz de fallas de sistema FDI

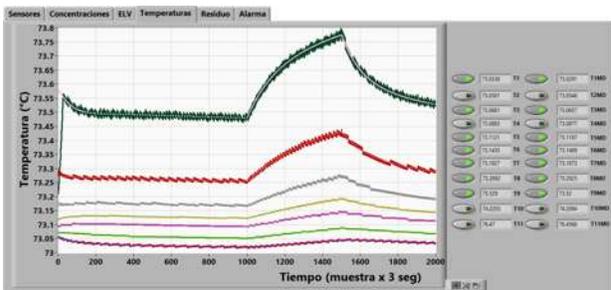
Falla	S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}	S_{31}	S_{32}	S_{41}	S_{42}	S_{51}	S_{52}	S_{61}	S_{62}	S_{71}	S_{72}
Γ_1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Γ_2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Γ_3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Γ_4	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
Γ_5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Γ_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
Γ_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1



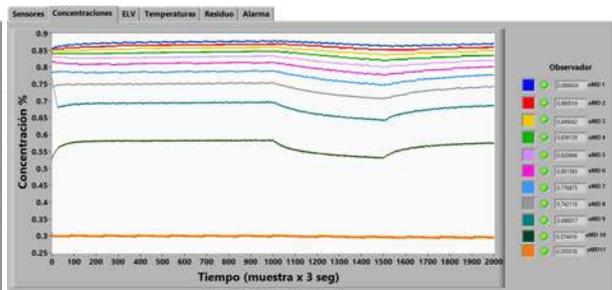
(a) Comunicación con sensores



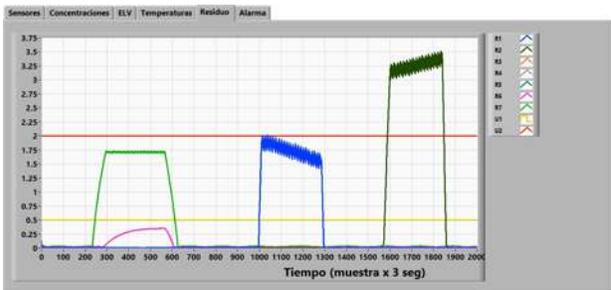
(b) Diagrama equilibrio Líquido-Vapor



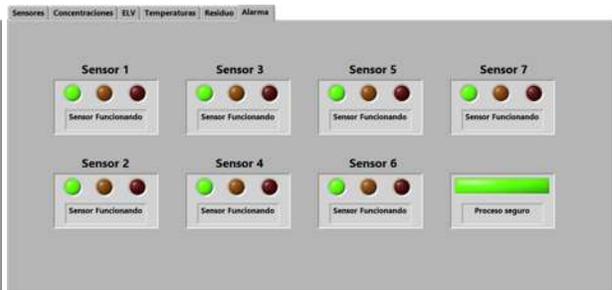
(c) Temperaturas de sensores y observador



(d) Estimación de concentraciones



(e) Residuos del sistema FDI

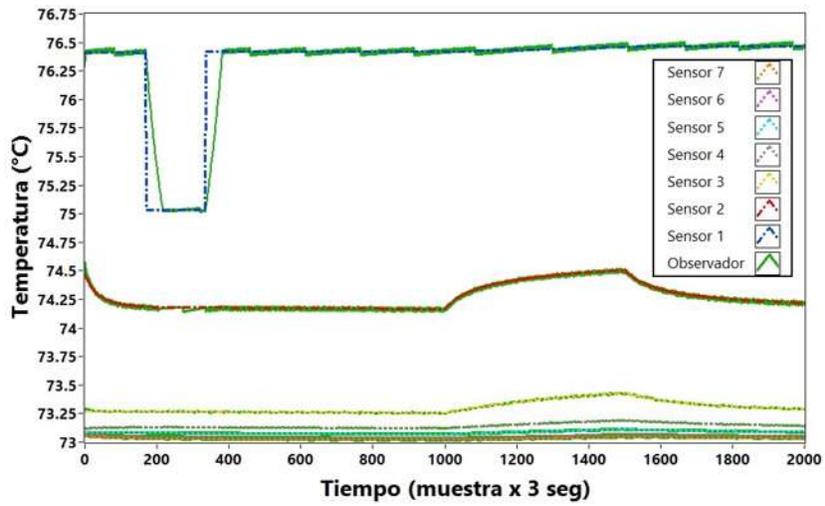


(f) Alarmas de falla

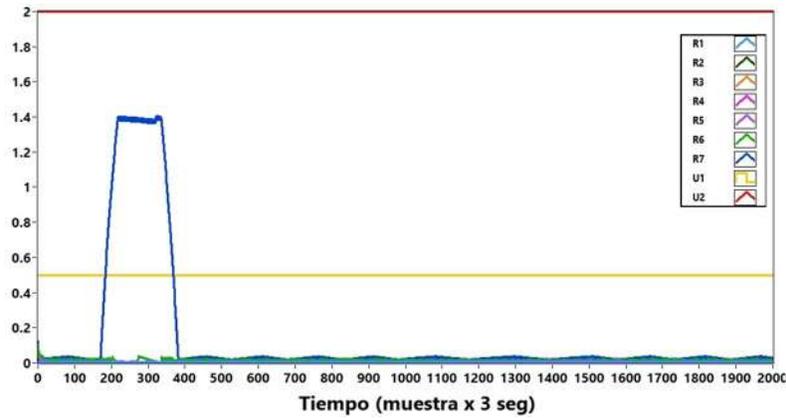
Figura 4.4: Ventanas de la estación de monitoreo en LabVIEW

Descalibración de sensor

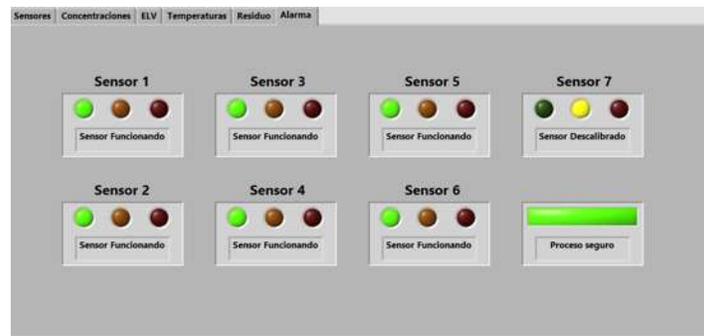
La Figura 4.5 muestra la detección de un sensor descalibrado durante un proceso en línea mediante el sistema FDI. La Figura 4.5(a) muestra la gráfica de las temperaturas en los platos, donde se observa la descalibración del sensor en el condensador. La Figura 4.5(b) muestra los residuos generados por observador donde se muestra que el residuo R1 se ubica sobre el umbral de descalibración pero por debajo del umbral de falla, de acuerdo a la firma de fallas, el sistema FDI detecta como descalibración el residuo, 4.5(c).



(a) Gráfica de temperaturas con descalibración de sensor



(b) Gráfica de residuos con descalibración de sensor



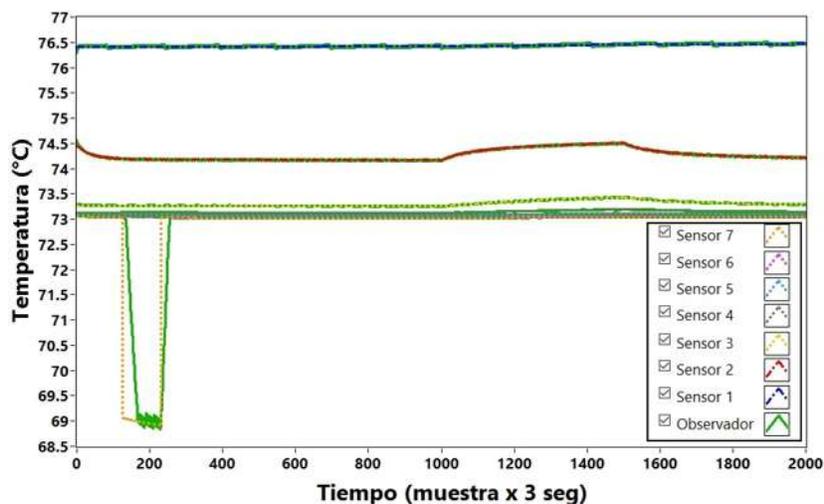
(c) Alarmas de falla con descalibración de sensor

Figura 4.5: Sistema FDI: descalibración de sensor

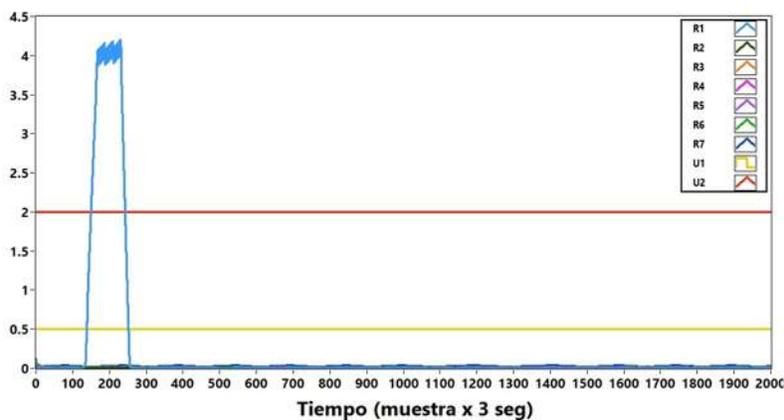
Falla en un sensor

La Figura 4.6 muestra la detección de una falla de un sensor. La Figura 4.6(a) la presencia de una falla abrupta de $4C^{\circ}$ en el sensor 7 ubicado en el hervidor. La gráfica

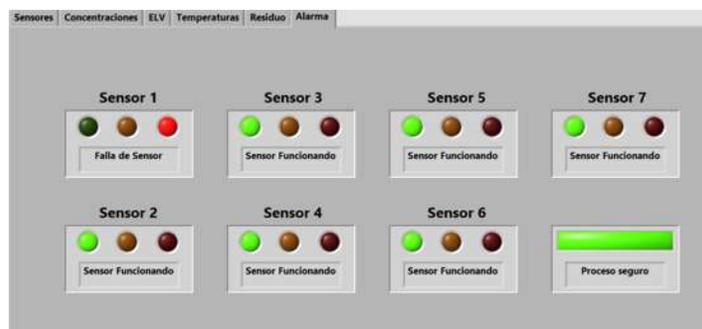
de residuos generados se muestra en la Figura 4.6(b) donde se observa que el residuo R7 correspondiente al sensor se ubica por arriba del umbral de falla en el sistema FDI y por lo tanto la estación de monitoreo enciende la alarma, como se muestra en la Figura 4.6(c).



(a) Gráfica de temperaturas con falla de sensor



(b) Gráfica de residuos con falla de sensor



(c) Alarmas de falla con falla de sensor

Figura 4.6: Sistema FDI: falla de sensor

Fallas en dos sensores

La Figura 4.7 muestra una falla abrupta en el sensor 1 y una descalibración en el sensor 7 de forma simultánea. La Figura 4.7(a) muestra la dinámica de las temperaturas reales y del observador, donde se observa la falla abrupta en el sensor 1 así como la convergencia del observador. La Figura 4.7(b) muestra los residuos generados por el observador debido a la falla abrupta y a una descalibración del sensor 7. La Figura 4.7(c) muestra las alarmas de falla, donde se observa que la alarma del sensor 1 está activa y también la alarma de descalibración del sensor 7.

Fallas en múltiples sensores

La Figura 4.8 muestra la validación del sistema FDI con 3 fallas en los sensores de la columna de destilación, lo que indica que el proceso no es seguro y se encuentra ante una falla de proceso. La Figura 4.8(a) muestra la dinámica de las temperaturas reales de columna así como la convergencia del observador ante presencia de 3 fallas simultáneas. La Figura 4.7(b) muestra los residuos generados, donde se observa que los residuos R1, R2 y R7 están por arriba del umbral de falla por lo que se considera una falla del proceso. Por lo tanto en la Figura 4.8(c) se muestra las alarmas encendidas de los sensores en falla así como la alarma de paro debido a la falla en proceso.

4.5 Sistema de detección y diagnóstico de fallas y control tolerante para el actuador

El esquema a bloques del sistema de detección y diagnóstico de fallas y el control tolerante para el actuador se muestra en la Figura 4.9.

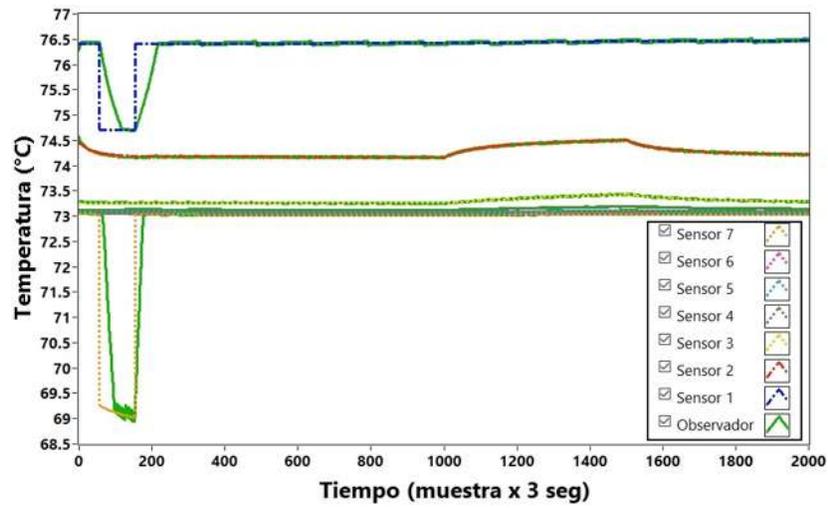
El sistema de diagnóstico y detección de fallas en el actuador se basa un banco de dos observadores difusos con modos deslizantes, que tienen entradas de referencia distintas para la etapa de corrección del observador, la diferencia entre las estimaciones de ambos observadores permite detectar y diagnosticar el tipo de falla en el convertidor. Las entradas de referencia son la corriente en el inductor (i_L) para un observador y el voltaje en el capacitor (v_C) para el otro observador.

La generación de residuos se determina por la expresión (4.11).

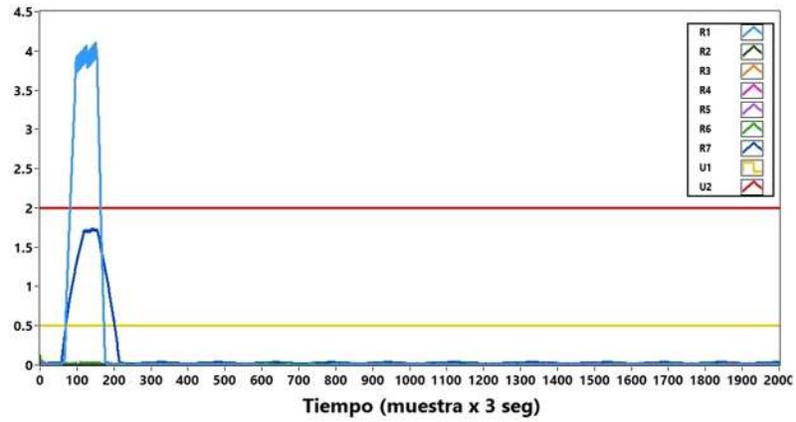
$$\hat{h}_i = w - \hat{w}_i \quad (4.11)$$

donde \hat{w}_i son los estados estimados de cada observador, con $i = 1, 2$.

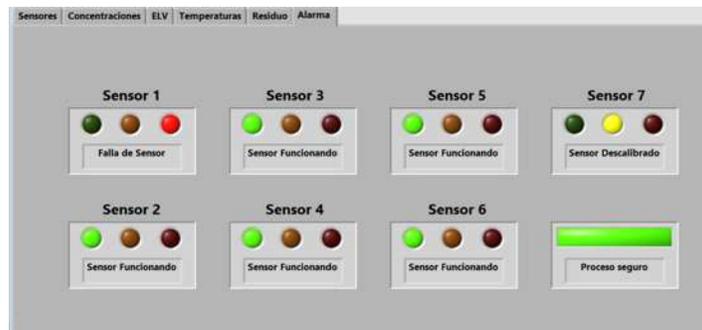
La evaluación de residuos para obtener los síntomas para diagnosticar y detectar el tipo de falla en el convertidor se realiza con la firma de fallas presentada en la Tabla 4.2. donde las fallas que detecta el sistema FDD son:



(a) Gráfica de temperaturas con falla y descalibración de sensor



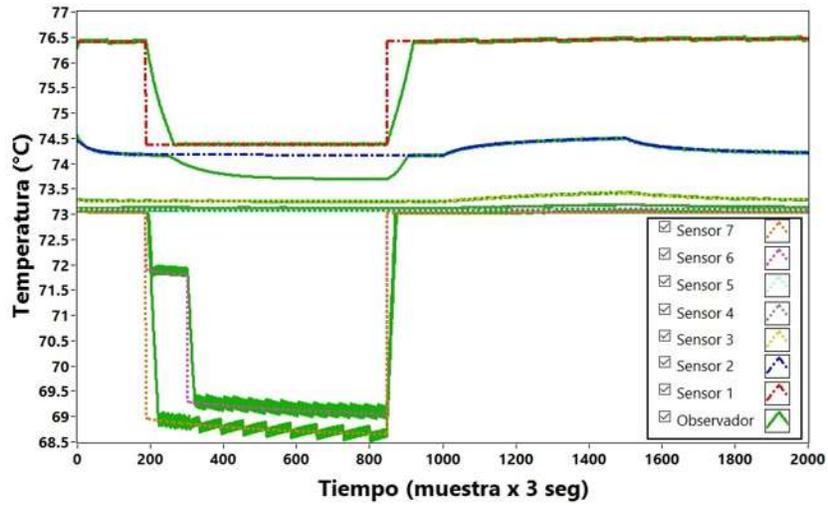
(b) Gráfica de residuos con falla y descalibración de sensor



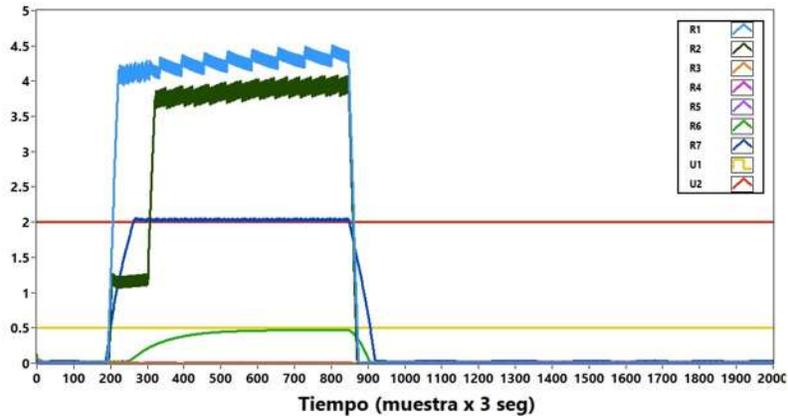
(c) [Alarmas de falla con falla y descalibración de sensor

Figura 4.7: Sistema FDI: falla de sensor y de descalibración simultánea

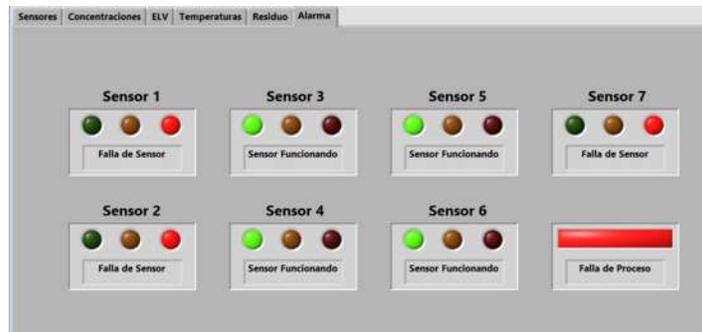
- F1: Decremento en el voltaje nominal de alimentación del convertidor (V_{cc}).
- F2: Incremento en el voltaje nominal de alimentación del convertidor (V_{cc}).



(a) Gráfica de temperaturas con fallas simultáneas



(b) Gráfica de residuos con fallas simultáneas



(c) Alarmas de falla con fallas simultáneas

Figura 4.8: Sistema FDI: fallas múltiples

- F3: Decremento en la magnitud de la carga nominal (R_L).
- F4: Incremento en la magnitud de la carga nominal (R_L).

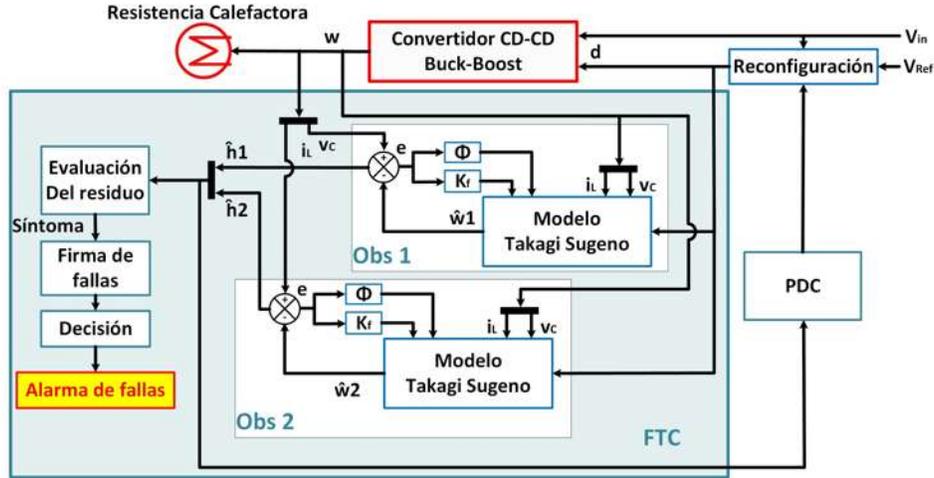


Figura 4.9: Esquema de diagnóstico y detección de fallas y control tolerante a fallas para el actuador

Tabla 4.2: Matriz de fallas de sistema FDD

Falla	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
\hat{h}_{i_L1}	-1	1	1	-1	1	0	1
\hat{h}_{i_L2}	-1	1	1	-1	-1	1	1
\hat{h}_{v_C1}	1	-1	1	-1	1	-1	1
\hat{h}_{v_C2}	1	-1	0	0	1	-1	-1

- F5: Decremento en el voltaje nominal de alimentación del convertidor (V_{cc}) y decremento en la magnitud de la carga nominal (R_L).
- F6: Incremento en el voltaje nominal de alimentación del convertidor (V_{cc}) e incremento en la magnitud de la carga nominal (R_L).
- F7: Incremento en el voltaje nominal de alimentación del convertidor (V_{cc}) y decremento en la magnitud de la carga nominal (R_L).

El control tolerante se basa en un controlador PDC y en una reconfiguración del ciclo de servicio $d(t)$. La reconfiguración del ciclo de servicio se determina mediante un voltaje de referencia (V_{ref}), el voltaje de entrada del convertidor (V_{in}) y la salida del control PDC u y se define en (4.12)

$$d(t) = d_{ref}(t) - u(t) \quad (4.12)$$

$d_{ref}(t)$ es el ciclo de servicio de referencia determinado por

$$d_{ref}(t) = \frac{V_{ref}}{V_{ref} - V_{in}} \quad (4.13)$$

y la señal de control $u(t)$ se determina de acuerdo a los estados del modelo (4.1) y a la evaluación de residuos.

4.5.1 Simulación del sistema FDD y control FTC para el actuador del hervidor

La simulación del sistema FTC se realiza para un convertidor Buck-Boost que regula el voltaje a una resistencia calefactora de 350 W para el hervidor de la columna de destilación Edf-1000.

Los parámetros de diseño del controlador y los observadores para el sistema FDD y FTC se determinan para el caso de estudio presentado en la Tabla 3.7; y se valida mediante simulación en MATLAB el comportamiento del esquema FTC y FDI para las fallas: variación en voltaje de entrada al convertidor ocasionado principalmente por el voltaje de alimentación (voltaje de línea) y causante de choques térmicos debido a la alta potencia suministrada al hervidor o la lentitud de la dinámica del proceso debido a la poca potencia suministrada en la resistencia calefactora. Las variaciones en carga suelen ser por degradación de la resistencia calefactora o de fabricación.

La estructura del sistema de control-observador para el convertidor Buck-Boost se expresa en (4.14)

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + \left(\sum_{i=1}^4 h_i(z_1, z_2)B_i\right)d(t) \\ y(t) &= \sum_{i=1}^4 h_i(z_1, z_2)C_i x(t) \\ u(t) &= -\sum_{i=1}^4 h_i(z(t))F_i \hat{x}(t)\end{aligned}\quad (4.14)$$

De acuerdo a las características del sistema difuso, donde $A_1, A_2, A_3, A_4 = A$, el sistema de LMI's para determinar la estabilidad del sistema difuso con 8 reglas a lazo cerrado con observador y controlador se expresan en (4.15).

$$\begin{aligned}P_1 &> 0 \\ P_2 &> 0 \\ A^T P_2 - C_1^T N_1^T + P_2 A - N_1 C_1 &< 0 \\ P_1 A^T - M_1^T B_1^T + A P_1 - B_1 M_1 &< 0 \\ P_1 A^T - M_2^T B_2^T + A P_1 - B_2 M_2 &< 0 \\ P_1 A^T - M_3^T B_3^T + A P_1 - B_3 M_3 &< 0 \\ P_1 A^T - M_4^T B_4^T + A P_1 - B_4 M_4 &< 0\end{aligned}\quad (4.15)$$

Las LMI's que representan los traslapes de las funciones de membresía se expresan en (4.16)

$$\begin{aligned}P_1 A^T - M_2^T B_1^T + A P_1 - B_1 M_2 - M_1^T B_2^T - B_2 M_1 &< 0 \\ P_1 A^T - M_3^T B_1^T + A P_1 - B_1 M_3 - M_1^T B_3^T - B_3 M_1 &< 0 \\ P_1 A^T - M_4^T B_1^T + A P_1 - B_1 M_4 - M_1^T B_4^T - B_4 M_1 &< 0 \\ P_1 A^T - M_3^T B_2^T + A P_1 - B_2 M_3 - M_2^T B_3^T - B_3 M_2 &< 0 \\ P_1 A^T - M_4^T B_2^T + A P_1 - B_2 M_4 - M_2^T B_4^T - B_4 M_2 &< 0 \\ P_1 A^T - M_4^T B_3^T + A P_1 - B_3 M_4 - M_3^T B_4^T - B_4 M_3 &< 0\end{aligned}\quad (4.16)$$

dada la solución para P_2 , la ganancia K para el observador es determinada por (4.17)

$$K = P_2^{-1} N_1 \quad (4.17)$$

y las ganancias para el controlador F_i se determinan en (4.18)

$$\begin{aligned} F_1 &= M_1 P_1^{-1} \\ F_2 &= M_2 P_1^{-1} \\ F_3 &= M_3 P_1^{-1} \\ F_4 &= M_4 P_1^{-1} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Perturbación en voltaje de alimentación del actuador

Para la validación del sistema FTC se realizan perturbaciones en el voltaje de alimentación V_{cc} del actuador. La Figura 4.10 muestra la dinámica de las etapas del sistema FDD ante perturbaciones de voltaje nominal (180 V) de alimentación. Las variaciones de voltaje se realizan de forma secuencial de acuerdo a la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Secuencia de fallas abruptas en el voltaje nominal

Parámetro	Falla	Tiempo
V_{cc}	decremento al 83.3 % del voltaje nominal (150 V)	0.075 ms
V_{cc}	incremento al 100 % del voltaje nominal (180 V)	0.15 ms
V_{cc}	incremento al 116.6 % del voltaje nominal (210 V)	0.225 ms
V_{cc}	decremento al 100 % del voltaje nominal (180 V)	0.3 ms

La Figura 4.10 muestra la dinámica de los observadores ante las fallas presentadas en la Tabla 4.3, donde se muestra la convergencia de ambos observadores entre 0 ms y 0.075 ms debido a la ausencia de fallas. Además el observador con la medición de v_C como referencia tiene un error absoluto de estimación máximo del 22.72 % generando los residuos de la Figura 4.11. Los síntomas que se obtienen por la evaluación de los residuos relativos con los umbrales se muestran en la Figura 4.12 permitiendo detectar y determinar la falla en el actuador a partir de la firma de fallas de la Tabla 4.2

La acción de control ante las perturbaciones de voltaje de entrada se muestra en la Figura 4.13, donde se observa el ajuste del ciclo de servicio d del convertidor para regular el voltaje de salida a -100 V.

Variaciones de carga

La resistencia calefactora del hervidor puede variar en su valor nominal debido al material de fabricación además del deterioro por el uso y envejecimiento, por lo que se realizan casos de estudio en el sistema FDD para validar su desempeño ante estas variaciones en carga nominal (70.3Ω). La Tabla 4.4 presenta la secuencia de las variaciones en tiempo de la carga nominal del hervidor.

En la Figura 4.14 se muestra la dinámica de los observadores del sistema FDD ante las variaciones secuenciales de la magnitud de la resistencia calefactora (R), donde

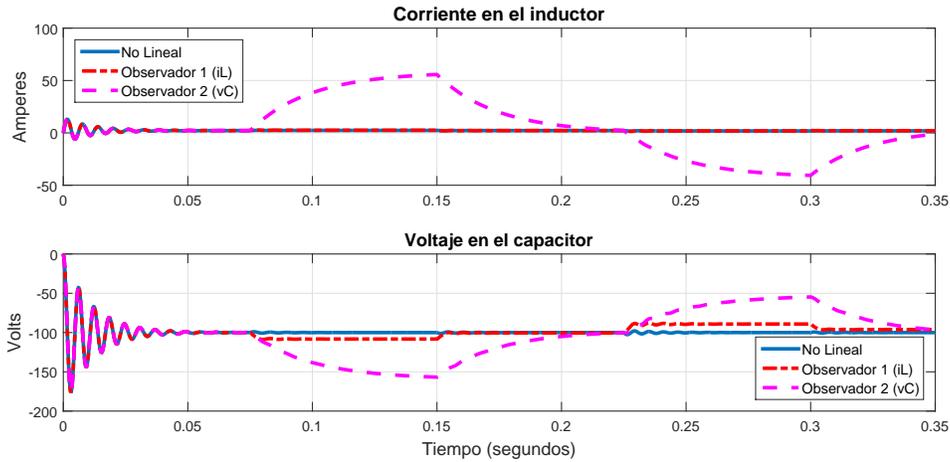


Figura 4.10: Dinámica de los observadores y modelo no lineal con perturbaciones en el voltaje de alimentación.

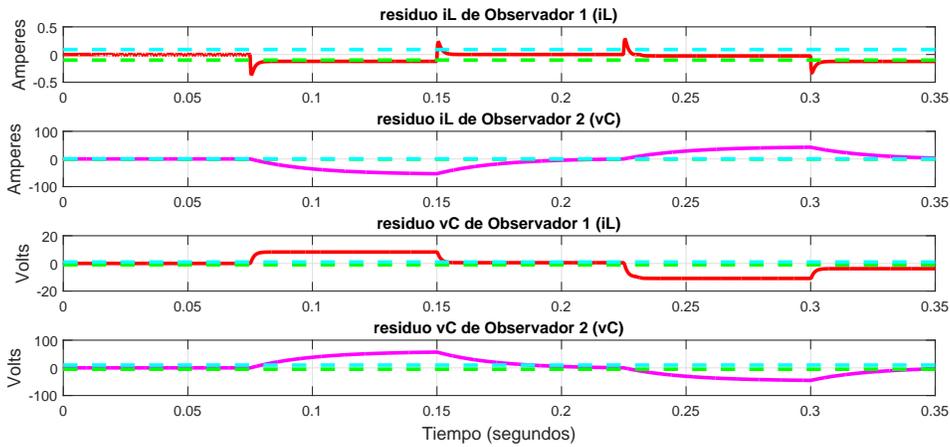


Figura 4.11: Residuos generados por observadores por perturbaciones en voltaje de alimentación.

Tabla 4.4: Secuencia de fallas en carga

Parámetro	Falla	Tiempo
R_L	decremento al 71.1 % de la carga nominal (50Ω)	0.075 ms
R_L	incremento al 100 % de la carga nominal (70.3Ω)	0.15 ms
R_L	incremento al 114.2 % de la carga nominal (80Ω)	0.225 ms
R_L	decremento al 100 % de la carga nominal (70.3Ω)	0.3 ms

se muestra que el observador con entrada de referencia i_L presenta un error absoluto máximo de estimación del 7.72 % debido a la sensibilidad de la estimación de la corriente \hat{i}_L del observador. Además, los residuos relativos generados por los observadores se muestran en la Figura 4.15, que al evaluarlos respecto a la firma de fallas de la Tabla 4.4 permiten obtener los síntomas.

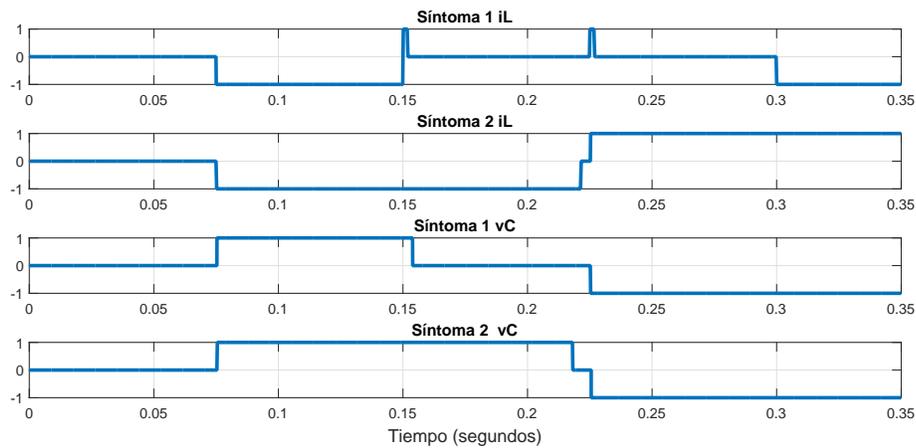


Figura 4.12: Síntomas obtenidos por los residuos generados con perturbaciones en el voltaje de alimentación.

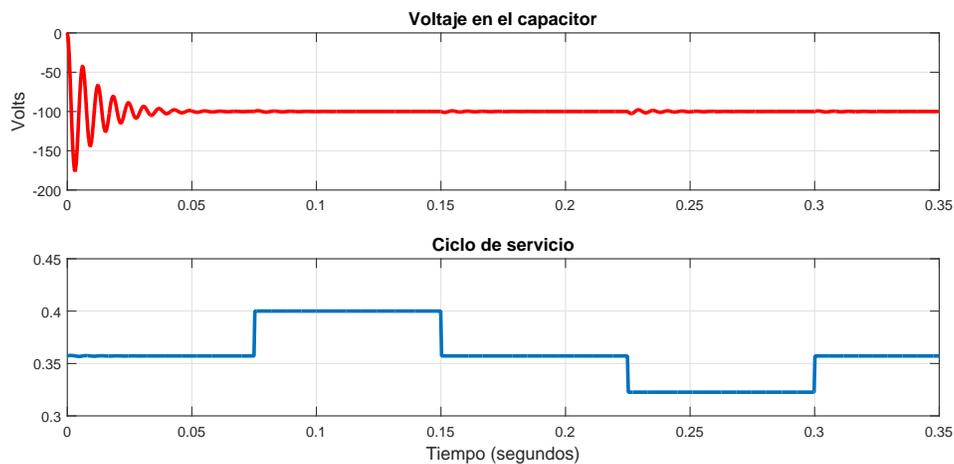


Figura 4.13: Ajuste de ciclo de servicio d ante fallas abruptas de voltaje de alimentación.

Los síntomas que resultan de la evaluación de los residuos a causa de las perturbaciones en carga se muestran la Figura 4.16, los cuales de acuerdo a la firma de fallas permiten determinar y diagnosticar las fallas en el sistema FDD.

En la Figura 4.17 se muestra el ajuste del ciclo de servicio para regular el voltaje de salida a -100 V debido a las variaciones en la carga.

Fallas mixtas y simultáneas

Para la validación del desempeño de detección y diagnóstico de fallas se realizan casos de estudio con fallas mixtas y simultáneas en el actuador.

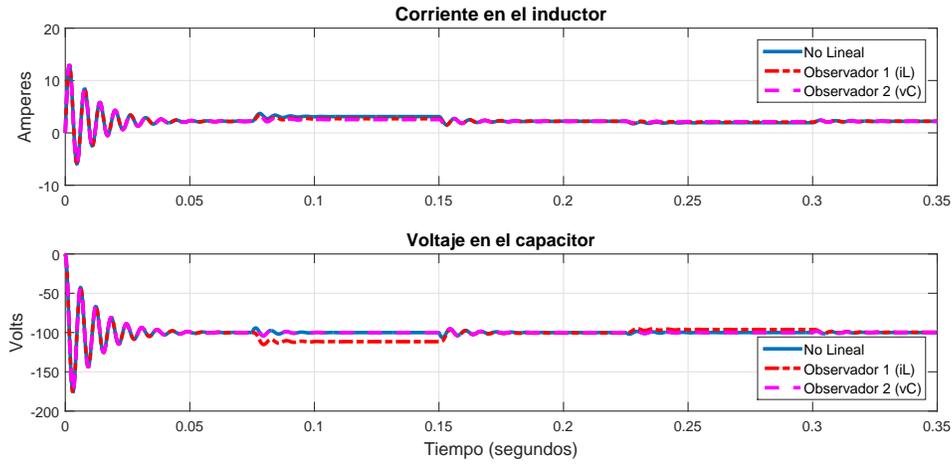


Figura 4.14: Dinámica de los observadores y modelo no lineal con perturbaciones en la carga.

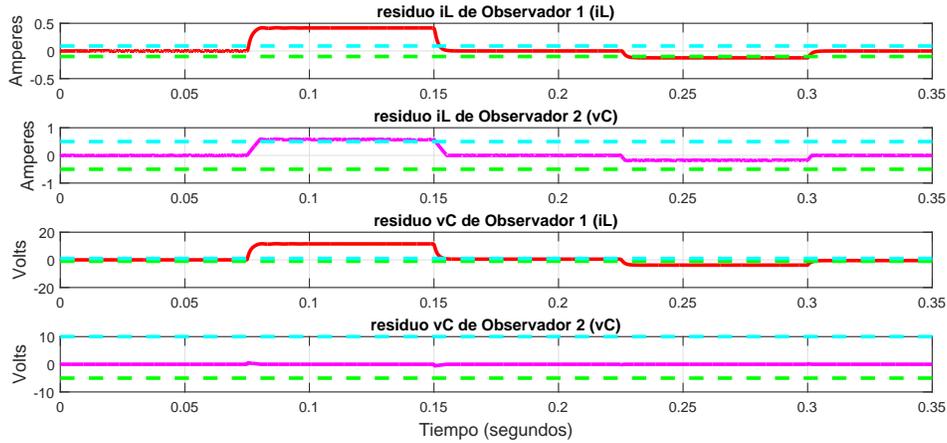


Figura 4.15: Residuos generados por observadores por perturbaciones en la carga.

La Tabla 4.5 presenta las variaciones en la carga y voltaje nominales para determinado tiempo y de forma secuencial.

Tabla 4.5: Secuencia de fallas en carga

Parámetro	Falla	Tiempo
V_{cc}	Decremento al 83.3 % del voltaje nominal (150 V)	0.075 ms
R_L	Decremento al 71.1 % de la carga nominal (50 Ω)	0.075 ms
V_{cc}	Incremento al 100 % del voltaje nominal (180 V)	0.15 ms
R_L	Incremento al 100 % de la carga nominal (70.3 Ω)	0.15 ms
V_{cc}	Decremento al 83.3 % del voltaje nominal (150 V)	0.225 ms
R_L	Incremento al 114.2 % de la carga nominal (80 Ω)	0.225 ms
V_{cc}	Incremento al 100 % del voltaje nominal (180 V)	0.3 ms
R_L	Decremento al 100 % de la carga nominal (70.3 Ω)	0.3 ms

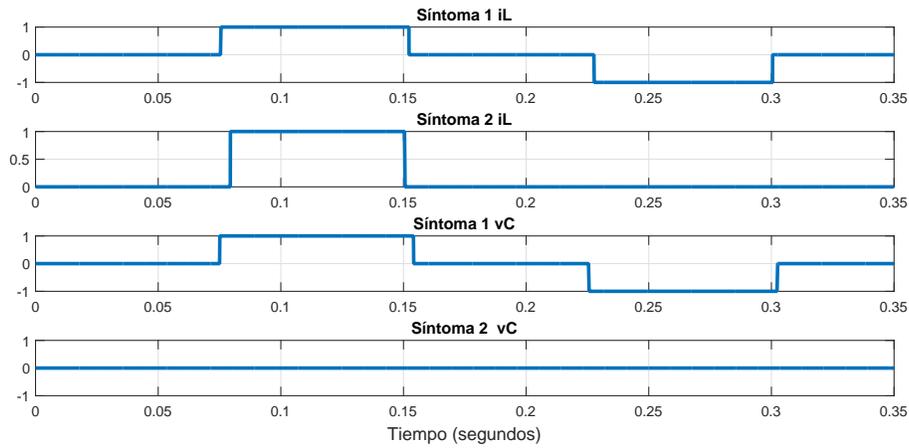


Figura 4.16: Síntomas obtenidos por los residuos generados con perturbaciones en el voltaje de alimentación.

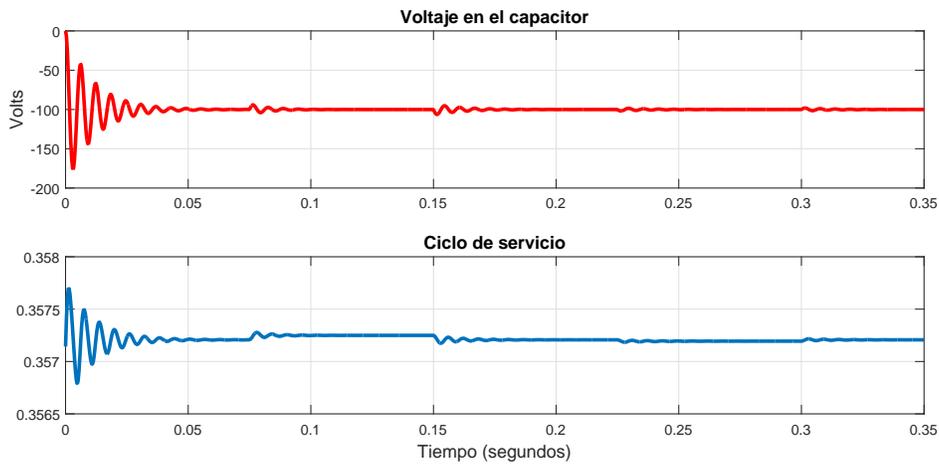


Figura 4.17: Ajuste de ciclo de servicio d ante fallas en la carga.

La Figura 4.18 muestra la dinámica de los observadores cuando se tienen dos fallas simultáneas, perturbaciones en voltaje de alimentación y en la carga.

La Figura 4.19 muestra los residuos generados por los observadores con perturbaciones mixtas y simultáneas.

Los síntomas que resultan de la evaluación de los residuos a causa de las perturbaciones en carga se muestran la Figura 4.20, los cuales de acuerdo a la firma de fallas permiten determinar y diagnosticar las fallas en el sistema FDD.

En la Figura 4.21 se muestra el ajuste del ciclo de servicio para regular el voltaje de salida a -100 V debido a las perturbaciones.

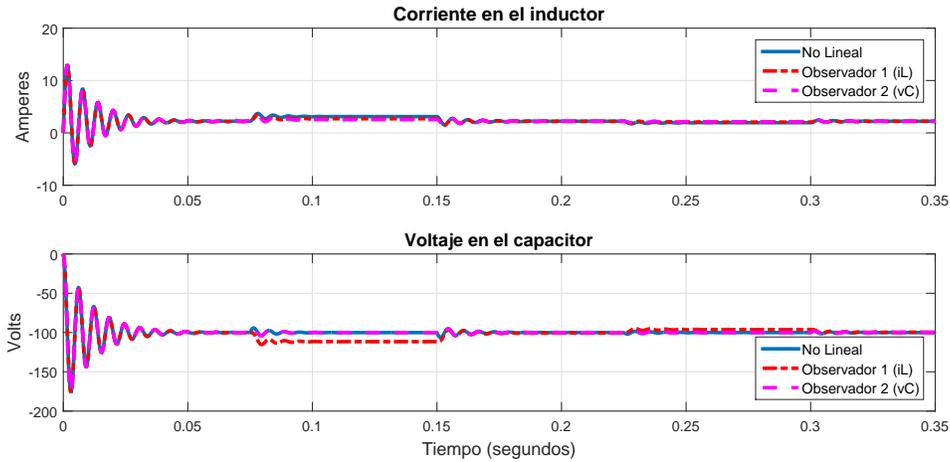


Figura 4.18: Dinámica de los observadores y del modelo no lineal con perturbaciones mixtas y simultáneas.

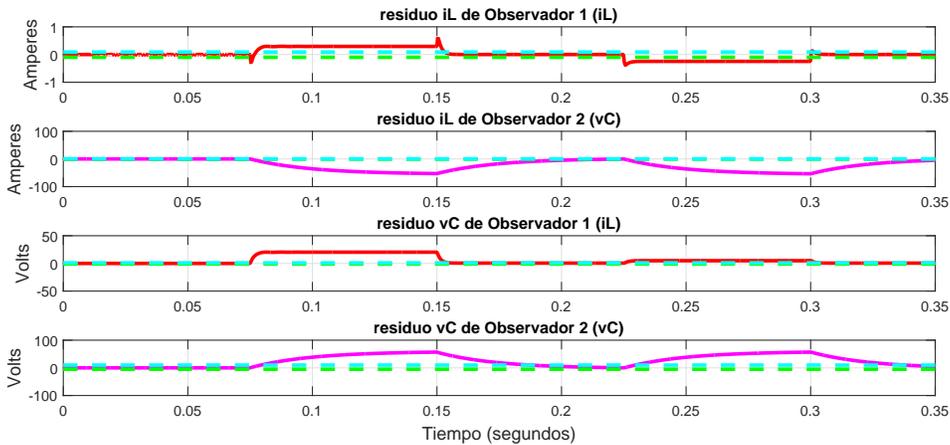


Figura 4.19: Residuos generados por observadores por perturbaciones mixtas y simultáneas.

Conclusiones

En este capítulo 4 se presenta el diseño, simulación y validación experimental de un sistema de detección y aislamiento de fallas para sensores de temperatura en una planta piloto de destilación de 11 platos. El sistema FDI se basa en un observador difuso con modos deslizantes como generador de residuos para detectar y localizar la falla. La validación experimental se realiza en un proceso de destilación de la mezcla Etanol-Agua, donde se observa la robustez del sistema FDI ante fallas aditivas múltiples en los sensores.

También se presenta el diseño y simulación del control tolerante a fallas para el actuador de la columna de destilación con la finalidad de regular la potencia calórica en

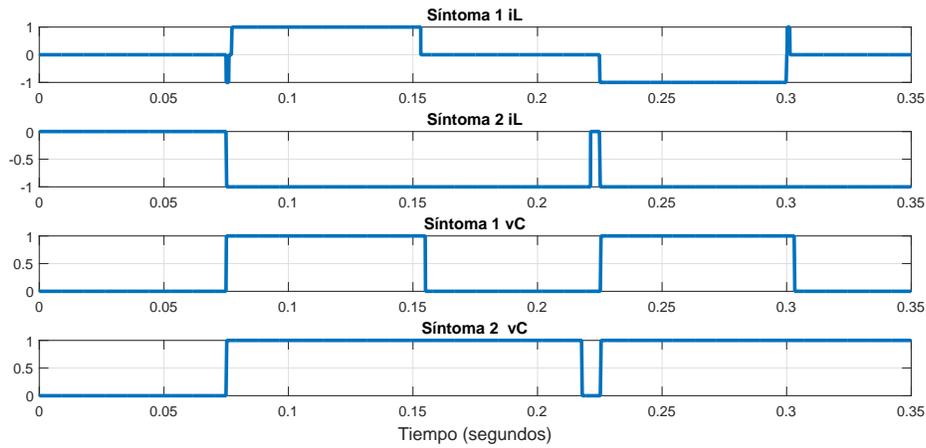


Figura 4.20: Síntomas obtenidos por los residuos generados con perturbaciones mixtas y simultáneas.

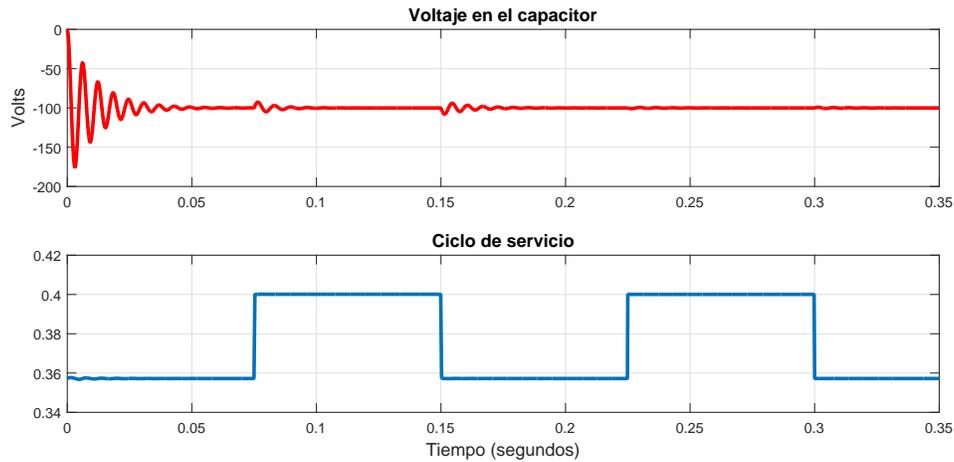


Figura 4.21: Ajuste de ciclo de servicio d ante fallas mixtas y simultáneas

el hervidor de la planta piloto. El actuador se conforma por un convertidor Buck-Boost que regula el voltaje de salida para la resistencia calefactora. El esquema FTC se forma por un banco de observadores con difente entrada de referencia para la corrección de la estimación, lo cual permite detectar las fallas en el sistema de una manera mas fiable y eficiente. El observador difuso con modos deslizantes es el tipo de observador utilizado en el esquema FTC debido a la robustez que tiene ante fallas aditivas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 Conclusiones

En este trabajo de tesis se propuso un esquema de control tolerante a fallas para una columna de destilación. El esquema de control tolerante se basa en redundancia analítica para detectar, diagnosticar y localizar fallas en sistema, el cual está compuesto por una plata piloto de destilación y un convertidor CD-CD como actuador para regular la potencia en la resistencia calefactora del hervidor.

El sistema de detección y aislamiento de fallas propuesto en este trabajo de tesis, puede detectar y localizar fallas en los sensores de temperatura tipo RTD ubicados en la planta piloto EDF-1000. La detección se realiza mediante un observador difuso con modos deslizantes, el cual tiene la suficiente robustez para generar los residuos ante fallas aditivas de los sensores, facilitando la ubicación del sensor con falla en la columna de destilación.

El observador estima las concentraciones y las temperaturas de los once platos de la planta piloto, toma como superficie deslizante al error de estimación con respecto a las salidas medidas, las ganancias y estabilidad se determinan mediante la solución de desigualdades matriciales. Se utiliza un modelo difuso Takagi-Sugeno de ocho reglas difusas tomando como variables difusas las concentraciones del condensador y del hervidor así como la acción de reflujo.

Para diseñar los submodelos del Takagi-Sugeno se realiza el análisis de voltabilidad relativa variable y constante que determinan la concentración de vapor, también se obtienen los puntos de operación de manera experimental.

La validación del sistema FDI y del observador se desarrolla de forma experimental donde se puede observar la robustez del observador ante fallas aditivas y fiabilidad del sistema FDI para detectarlas.

El sistema FDD para el actuador permite detectar fallas ante perturbaciones en el voltaje de alimentación y variaciones en la carga, se basa en un banco de dos observadores difusos con modos deslizantes que generan los residuos para determinar la falla.

El observador difuso con modos deslizantes se basa en un modelo difuso Takagi-Sugeno de un convertidor Buck-Boost tomando como variables premisas a la corriente del inductor y el voltaje de capacitor y la superficie deslizante es el error de estimación.

La compensación distribuida paralela aplicada al actuador se diseña en conjunto al observador para determinar las ganancias y la estabilidad del sistema a lazo cerrado mediante las desigualdades matriciales lineales.

El controlador regula el voltaje aplicado a la resistencia calefactora de manera adecuada ante las fallas abruptas de voltaje de alimentación y de la carga.

5.2 Trabajos Futuros

Como trabajos futuros se propone:

- Diseñar un modelo Takagi-Sugeno con mayor número de variables premisas que permita mejorar la resolución de la estimación en observador ante variaciones en el reflujo.
- Diseñar e implementar un actuador para el reflujo en la columna EDF-1000 que permita medir y regular de manera adecuada la cantidad de concentración que reingresa al cuerpo de la columna.
- Diseñar un banco de observadores dedicados como sistema de detección y aislamiento de fallas para analizar y comparar los resultados presentados en este trabajo de tesis.
- Implementar y validar el observador difuso con modos deslizantes diseñado en este trabajo de tesis.
- Implementar el sistema de detección y diagnóstico de fallas en el actuador presentado en este trabajo.
- Implementar y validar el esquema de control tolerante a fallas.

BIBLIOGRAFÍA

- [Aggoune et al., 2016] Aggoune, L., Chetouani, Y., and Raïssi, T. (2016). Fault detection in the distillation column process using kullback leibler divergence. *ISA transactions*, pages 1–2.
- [Angelov and Filev, 2004] Angelov, P. P. and Filev, D. P. (2004). An approach to online identification of takagi-sugeno fuzzy models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 34(1):484–498.
- [Anzurez-Marín, 2007] Anzurez-Marín, J. (2007). Diagnóstico de fallas en sistemas no lineales usando lógica difusa y observadores con modos deslizantes, doctor in science electrical engineering specialty thesis. *CINVESTAV, Mexico*.
- [Arazi et al., 2018] Arazi, M., Payman, A., Camara, M. B., and Dakyo, B. (2018). Study of different topologies of dc-dc resonant converters for renewable energy applications. pages 1–6. IEEE.
- [Astorga et al., 2006] Astorga, C. M., Quintero-Mármol, E., Vela, L. G., and Torres, L. (2006). Observador no lineal para la estimación de concentraciones en un proceso de destilación metanol/etanol. *Información tecnológica*, 17(6):35–41.
- [Balasubramhanya and Doyle Iii, 2000] Balasubramhanya, L. S. and Doyle Iii, F. J. (2000). Nonlinear model-based control of a batch reactive distillation column. *Journal of Process Control*, 10(2):209–218.
- [Banda Urbina, 2016] Banda Urbina, A. (2016). Análisis e implementación de estrategias de control tolerante a fallas.
- [Bask, 2005] Bask, M. (2005). Dynamic threshold generators for robust fault detection.
- [Bergsten et al., 2002] Bergsten, P., Palm, R., and Driankov, D. (2002). Observers for takagi-sugeno fuzzy systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 32(1):114–121.
- [Blanke et al., 2016] Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., and Staroswiecki, M. (2016). Introduction to diagnosis and fault-tolerant control. In *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*, pages 1–35. Springer.

- [Blanke et al., 2010] Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., Staroswiecki, M., and Schröder, J. (2010). *Diagnosis and fault-tolerant control*. Springer Publishing Company, Incorporated.
- [Blanke et al., 2001] Blanke, M., Staroswiecki, M., and Wu, N. E. (2001). Concepts and methods in fault-tolerant control. In *American Control Conference, 2001. Proceedings of the 2001*, volume 4, pages 2606–2620. IEEE.
- [Castillo-Toledo and Anzurez-Marin, 2005] Castillo-Toledo, B. and Anzurez-Marin, J. (2005). Model-based fault diagnosis using sliding mode observers to takagi-sugeno fuzzy model. pages 652–657. IEEE.
- [Castro, 2013] Castro, C. (2013). Control tolerante a fallas en actuadores. Master’s thesis, Universidad Autonoma de Mexico.
- [Cervantes et al., 2015a] Cervantes, M. H., Anguiano, A. T., Ramírez García, M., Zaragoza, C. A., and Archundia, E. R. (2015a). Validación experimental de un observador de alta ganancia reconfigurable para una columna de destilación. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 12(4):397–407.
- [Cervantes et al., 2015b] Cervantes, M. H., Montiel, M. F., Marín, J. A., Anguiano, A. C. T., and Ramírez, M. C. G. (2015b). Takagi-sugeno fuzzy model for dc-dc converters. pages 1–6. IEEE.
- [Cingara et al., 1990] Cingara, A., Jovanovic, M., and Mitrovic, M. (1990). Analytical first-order dynamic model of binary distillation column. *Chemical Engineering Science*, 45(12):3585–3592.
- [da Silva et al., 2015] da Silva, R., Defendi, R., Jorge, L., Tiski, V., and Lima, O. M. (2015). A comparative study between the use of reboilers and direct steam injection in distillation columns. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, 1(2):15942–15948.
- [del Carmen Téllez-Anguiano et al., 2017] del Carmen Téllez-Anguiano, A., Heras-Cervantes, M., Anzurez-Marín, J., Chávez-Campos, G. M., and Gnechchi, J. A. G. (2017). Mathematical modelling of batch distillation columns: A comparative analysis of non-linear and fuzzy models. IntechOpen.
- [Edwards et al., 2012] Edwards, C., Alwi, H., and Tan, C. (2012). Sliding mode methods for fault detection and fault tolerant control with application to aerospace systems. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 22(1):109–124.
- [Edwards et al., 2000] Edwards, C., Spurgeon, S. K., and Patton, R. J. (2000). Sliding mode observers for fault detection and isolation. *Automatica*, 36(4):541–553.
- [Frank and Ding, 1997] Frank, P. M. and Ding, X. (1997). Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems. *Journal of process control*, 7(6):403–424.

- [García-Morales et al., 2015] García-Morales, J., Adam-Medina, M., Escobar, R., Astorga-Zaragoza, C., and Garcia-Beltran, C. (2015). Diagnóstico de fallas múltiples en los sensores de un intercambiador de calor empleando observadores por modos deslizantes basado en el algoritmo super-twisting. *Revista mexicana de ingeniería química*, 14(2):553–565.
- [Gmehling et al., 1977] Gmehling, J., Onken, U., and Arlt, W. (1977). Chemistry data series. *DECHEMA, Dortmund*, 351:352.
- [González, 2012] González, A. A. (2012). *Control Tolerante a Fallas de Sistemas Singulares LPV Politópicos: Aplicación a una Columna de Destilación*. PhD thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- [Goupil, 2009] Goupil, P. (2009). Airbus state of the art and practices on fdi and ftc. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(8):564–572.
- [Hammouri et al., 2002] Hammouri, H., Targui, B., and Armanet, F. (2002). High gain observer based on a triangular structure. *International Journal of Robust and Non-linear Control*, 12(6):497–518.
- [Heras-Cervantes et al., 2013] Heras-Cervantes, M., Téllez-Anguiano, A., Ramírez, M. G., Gutierrez-Gnecchi, J., Fernández-Muñoz, O., and Olivares-Peregrino, V. (2013). Comparative analysis of high-gain observers applied to a distillation column. In *Power, Electronics and Computing (ROPEC), 2013 IEEE International Autumn Meeting on*, pages 1–5. IEEE.
- [Hernández, 2017] Hernández, B. R. C. (2017). Diseño de un observador difuso para una columna de destilación binaria tipo batch de 11 platos modelada en takagi-sugeno. Master’s thesis, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, División de estudios de posgrado, Facultad de ingeniería eléctrica.
- [Hernández, 2018] Hernández, G. F. O. (2018). Diseño, análisis y comparación de un observador difuso y uno difuso con modos deslizantes para una columna de destilación. Master’s thesis, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, División de estudios de posgrado, Facultad de ingeniería eléctrica.
- [Hyde et al., 1997] Hyde, J., Cuspinera, A., and Regué, J. (1997). *Control electro-neumático y electrónico*, volume 2. Marcombo.
- [Ibrahim et al., 2018] Ibrahim, D., Jobson, M., Li, J., and Guillén-Gosálbez, G. (2018). Optimization-based design of crude oil distillation units using surrogate column models and a support vector machine. *Chemical Engineering Research and Design*, 134:212–225.
- [Johanson and Murray-Smith, 1997] Johanson, T. and Murray-Smith, R. (1997). Operating regime approach to nonlinear modeling and control. *Multiple model approaches to modeling and control*, pages 3–72.

- [Kienle, 2000] Kienle, A. (2000). Low-order dynamic models for ideal multicomponent distillation processes using nonlinear wave propagation theory. *Chemical Engineering Science*, 55(10):1817–1828.
- [Lang and Gilles, 1990] Lang, L. and Gilles, E. D. (1990). Nonlinear observers for distillation columns. *Computers & chemical engineering*, 14(11):1297–1301.
- [Lawal and Zhang, 2015] Lawal, S. A. and Zhang, J. (2015). Actuator fault monitoring and fault tolerant control in distillation columns. In *Automation and Computing (ICAC), 2015 21st International Conference on*, pages 1–6. IEEE.
- [Li and Olson, 1991] Li, R. and Olson, J. H. (1991). Fault detection and diagnosis in a closed-loop nonlinear distillation process: application of extended kalman filters. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 30(5):898–908.
- [Lian et al., 2006] Lian, K.-Y., Liou, J.-J., and Huang, C.-Y. (2006). Lmi-based integral fuzzy control of dc-dc converters. *IEEE transactions on fuzzy systems*, 14(1):71–80.
- [Lopez et al., 2015] Lopez, F.-R., Ponsart, J.-C., Theilliol, D., Astorga-Zaragoza, C., and Flores-Montiel, M. (2015). Robust state and fault estimation observer for discrete-time d-lpv systems with unmeasurable gain scheduling functions. application to a binary distillation column. *IFAC-PapersOnLine*, 48(21):1012–1017.
- [Lopez-Saucedo et al., 2016] Lopez-Saucedo, E. S., Grossmann, I. E., Segovia-Hernandez, J. G., and Hernández, S. (2016). Rigorous modeling, simulation and optimization of a conventional and nonconventional batch reactive distillation column: A comparative study of dynamic optimization approaches. *Chemical Engineering Research and Design*, 111:83–99.
- [Luenberger, 1966] Luenberger, D. (1966). Observers for multivariable systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 11(2):190–197.
- [Manssouri et al., 2008] Manssouri, I., Chetouani, Y., and El Kihel, B. (2008). Using neural networks for fault detection in a distillation column. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 32(3):181–186.
- [Murray-Smith and Johansen, 1997] Murray-Smith, R. and Johansen, T. (1997). *Multiple model approaches to nonlinear modelling and control*. CRC press.
- [Nakaiwa et al., 1997] Nakaiwa, M., Huang, K., Owa, M., Akiya, T., Nakane, T., Sato, M., and Takamatsu, T. (1997). Energy savings in heat-integrated distillation columns. *Energy*, 22(6):621–625.
- [Orozco et al., 2016] Orozco, G., Cortés, B., Heras, M., Téllez, A., and Anzures, J. (2016). Analysis and comparison of distillation column models considering constant and variable relative volatility. pages 1–6. IEEE.
- [Ortiz-Torres et al., 2016] Ortiz-Torres, G., Escobar, R., Adam-Medina, M., Astorga-Zaragoza, C., and Guerrero-Ramírez, G. (2016). Control tolerante a fallas activo en sensores y actuadores: Aplicación a una columna de destilación. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 13(1):67–79.

- [Osuolale and Zhang, 2016] Osuolale, F. N. and Zhang, J. (2016). Energy efficiency optimisation for distillation column using artificial neural network models. *Energy*, 106:562–578.
- [Paraschiv and Olteanu, 2015] Paraschiv, N. and Olteanu, M. (2015). Feedforward process control of a distillation column based on evolutionary techniques. In *System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2015 19th International Conference on*, pages 730–735. IEEE.
- [Patton, 1997] Patton, R. J. (1997). Fault-tolerant control systems: The 1997 situation. In *IFAC symposium on fault detection supervision and safety for technical processes*, volume 3, pages 1033–1054.
- [Patton, 2015] Patton, R. J. (2015). Fault-tolerant control. *Encyclopedia of Systems and Control*, pages 422–428.
- [Perry and Green, 1999] Perry, R. H. and Green, D. W. (1999). *Perry's chemical engineers' handbook*. McGraw-Hill Professional.
- [Puig et al., 2004] Puig, V., Quevedo, J., Escobet, T., Morcego, B., and Ocampo, C. (2004). Control tolerante a fallos (parte ii): mecanismos de tolerancia y sistema supervisor. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 1(2):5–21.
- [Puig et al., 2010] Puig, V., Quevedo, J., Escobet, T., Morcego, B., and Ocampo, C. (2010). Control tolerante a fallos (parte i): Fundamentos y diagnóstico de fallos. *Revista Iberoamericana de automática e informática industrial*, 1(1):15–31.
- [Quintero-Marmol et al., 1991] Quintero-Marmol, E., Luyben, W. L., and Georgakis, C. (1991). Application of an extended luenberger observer to the control of multicomponent batch distillation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 30(8):1870–1880.
- [Rashid, 2017] Rashid, M. H. (2017). *Power electronics handbook*. Butterworth-Heinemann.
- [Rojas et al., 2018] Rojas, C. A., Kouro, S., Perez, M. A., and Echeverria, J. (2018). Dc-dc mmc for hvdc grid interface of utility-scale photovoltaic conversion systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(1):352–362.
- [Safdarnejad et al., 2016] Safdarnejad, S. M., Gallacher, J. R., and Hedengren, J. D. (2016). Dynamic parameter estimation and optimization for batch distillation. *Computers & Chemical Engineering*, 86:18–32.
- [Shafeeq et al., 2010] Shafeeq, A., Daood, S. S., Muhammad, A., and Ijaz, A. (2010). Effect of variable reflux ratio on binary distillation in a laboratory scale distillation column. In *2010 2nd International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering*, pages 35–38. IEEE.

- [Skogestad, 1997] Skogestad, S. (1997). Dynamics and control of distillation columns: A tutorial introduction. *Chemical Engineering Research and Design*, 75(6):539–562.
- [Takagi and Sugeno, 1985] Takagi, T. and Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (1):116–132.
- [Tanaka et al., 1998] Tanaka, K., Ikeda, T., and Wang, H. O. (1998). Fuzzy regulators and fuzzy observers: relaxed stability conditions and lmi-based designs. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 6(2):250–265.
- [Tanaka and Sugeno, 1992] Tanaka, K. and Sugeno, M. (1992). Stability analysis and design of fuzzy control systems. *Fuzzy sets and systems*, 45(2):135–156.
- [Tanaka and Wang, 2004] Tanaka, K. and Wang, H. O. (2004). *Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach*. John Wiley & Sons.
- [Tarakanath et al., 2014] Tarakanath, K., Patwardhan, S., and Agarwal, V. (2014). Internal model control of dc-dc boost converter exhibiting non-minimum phase behavior. pages 1–7. IEEE.
- [Téllez, 2010] Téllez, A. (2010). *Supervisión Electrónica de Columnas de Destilación Basada en Modelos*. PhD thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Departamento de Ingeniería Mecatrónica.
- [Téllez-Anguiano et al., 2012] Téllez-Anguiano, A., Astorga-Zaragoza, C., Alcortaga-García, E., Targui, B., Quintero-Marmol, E., Adam-Medina, M., and Olivares-Peregrino, V. (2012). Nonlinear continuous-discrete observer application to distillation columns. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 8(1):–.
- [Téllez Anguiano et al., 2009] Téllez Anguiano, A., Astorga Zaragoza, C., Targui, B., Aguilera González, A., Reyes Reyes, J., and Adam Medina, M. (2009). Experimental validation of a high gain observer for composition estimation in an ethanol-water distillation column. *Asia Pacific Journal of Chemical Engineering*, 4(6):942–952.
- [Torres et al., 2013] Torres, G. O., Escobar, R., Medina, M. A., Coronado, E. S., Zaragoza, C. A., Peregrino, V. O., and Anguiano, A. T. (2013). Detección y diagnóstico de fallas en sensores aplicado a una columna de destilación mediante un observador adaptable. In *AMCA*, pages–.
- [Verde et al., 2013] Verde, C., Gentil, S., and Morales-Menéndez, R. (2013). *Monitoreo y diagnóstico automático de fallas en sistemas dinámicos*. Trillas.
- [Wang et al., 1995] Wang, H. O., Tanaka, K., and Griffin, M. (1995). Parallel distributed compensation of nonlinear systems by takagi-sugeno fuzzy model. In *Fuzzy Systems, 1995. International Joint Conference of the Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and The Second International Fuzzy Engineering Symposium., Proceedings of 1995 IEEE Int*, volume 2, pages 531–538. IEEE.

- [Xu et al., 2013] Xu, L., Yuan, X., Chen, D., Luo, Y., and Yu, K. (2013). Reversibility analysis for design optimization of an internally heat-integrated distillation column. *Chemical Engineering & Technology*, 36(7):1147–1156.
- [Yinghua et al., 2002] Yinghua, Y., Ningyun, L., Fuli, W., and Liling, M. (2002). A new fault detection and diagnosis method based on principal component analysis in multivariate continuous processes. In *Intelligent Control and Automation, 2002. Proceedings of the 4th World Congress on*, volume 4, pages 3156–3160. IEEE.
- [Zhu, 1999] Zhu, Y. (1999). Distillation column identification for control using wiener model. In *American Control Conference, 1999. Proceedings of the 1999*, volume 5, pages 3462–3466. IEEE.