
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Electrónica

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**Control Tolerante a Fallas en Actuadores, con Aplicación a un Sistema
Termodinámico**

presentada por

Ing. Diego Alessis Carbot Rojas

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

Director de tesis

Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez

Codirector de tesis

Dr. José Alfredo Hernández Pérez

Cuernavaca, Morelos, México. Noviembre de 2015.

Dedicatoria

A Dios

Por permitirme cumplir este logro en mi vida profesional. Por nunca dejarme desamparado y estar conmigo en los momentos complicados que me han enseñado a valorarte cada día más.

A mi Madre

A quien le debo todo en la vida, por brindarme su apoyo incondicional, por sus consejos ,por su ejemplo de vida y sobre todo por brindarme su amor. Te amo.

A mi Hermano

Por siempre estar conmigo en los momentos alegres pero también en los momentos difíciles, por tus consejos y enseñanzas. Eres un ejemplo para mí Josimar.

A mis Familiares

Ya que siempre he contado con su apoyo y amor incondicional, por estar siempre ahí, por sus consejos, por todo lo que han aportado a mi vida y por todos los buenos momentos que pasamos juntos.

Gracias por todo. Les dedico esta tesis con mucho amor y cariño.

Agradecimientos

A mi mamá por amarme como lo hace, darme los consejos necesarios en cada momento justo de mi vida, por su apoyo incondicional y por siempre apoyarme en todas mis decisiones, en resumen por ser padre, madre y una amiga para mí.

A mi hermano Josimar por apoyarme aun en la distancia, por siempre estar al pendiente de mí y hacerme saber que siempre puedo contar contigo.

Al Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez por su esfuerzo y dedicación, además de sus enseñanzas, paciencia y motivación para el desarrollo de este trabajo de tesis.

Al Dr. José Alfredo Hernández Pérez por su apoyo y estímulos, que han sido fundamentales para la culminación de este trabajo.

A mis revisores: Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez y Dra. María Guadalupe López López, por sus valiosos comentarios, observaciones, disponibilidad y ayuda.

A mis compañeros y amigos: Juan Pablo Castillo, Leonardo Orozco, Moisés Ramos, Jesús Reyes, Leonardo Daniel Rodríguez, Abraham Pérez, Didier Montiel, Carlos Zuñiga, Cesar Márquez, Reyna Martínez, Lorena Ruiz, Marcos López, Miguel Xamán, Juan Joaquín, Adrián Velázquez, Oscar Gutiérrez, Saúl Beltrán, Ricardo Schacht, Jarniel García, Hugo Arellano, Ivonne Guerrero, Patricia Vázquez, Susana Sainz, Montserrat Alegría, con quienes compartí mi estancia en CENIDET, por brindarme su apoyo y amistad, son una familia para mí.

Al Dr. Manuel Adam Medina por compartir sus conocimientos, apoyo, consejos, pero sobre todo por la amistad brindada.

Al Tecnológico Nacional de México y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico por brindarme los medios necesarios para obtener mayores conocimientos y así crecer profesionalmente. Además por todas las atenciones otorgadas por el personal.

A CONACYT por el apoyo económico que me brindaron para la realización del trabajo.

Resumen

Esta tesis de maestría presenta un sistema de Control Tolerante a Fallas (CTF) en actuadores aplicado a un intercambiador de calor de tubos concéntricos y flujos a contracorriente. El intercambiador de calor tiene dos variables de entrada las cuales son, el flujo de agua fría y de agua caliente. El actuador principal manipula el flujo de agua fría para controlar la temperatura del agua caliente. El objetivo de este trabajo es mantener en operación continua el intercambiador de calor de tubos concéntricos y flujos a contracorriente, aun con una falla de atascamiento en su actuador principal. En caso de falla en el actuador principal, se propone controlar el proceso con la segunda variable de entrada (manipulando el flujo de agua caliente). Para lograr nuestro objetivo, se diseñó un sistema de Detección y Aislamiento de Fallas (FDI) y se proponen dos leyes de control: Control Predictivo Basado en Modelo (MPC por sus siglas en inglés Model Predictive Control) y Control por Modelo de Seguimiento (MFC por sus siglas en inglés Model Following Control). Para desarrollar el sistema FDI se implementó un observador adaptativo no lineal para estimar los flujos en el intercambiador de calor para ambas corrientes (caliente y fría). El sistema FDI permite detectar y aislar la falla en el actuador, una vez localizada la falla se realiza una reconfiguración en ley de control y una acomodación de la falla. En los resultados se muestra que es posible mantener el intercambiador de calor en operación continua incluso si el actuador principal está atascado. Así mismo se realiza una evaluación de cada una de las leyes de control propuestas en este trabajo.

Abstract

This master's thesis presents an actuator Fault Tolerant Control (FTC) system applied in a counter-current double pipe heat exchanger. The heat exchanger has two input variables which are, cold and hot flow rates. The main actuator manipulates the cold water flow rate in order to control the hot water temperature. The goal of this work is to keep in continuous operation the counter-current double pipe heat exchanger, even if the main actuator is stuck-open. In case of failure on the main actuator, it is proposed to control the process with the second input variable (by manipulating the hot water flow rate). To achieve our aim, we designed a FTC system based in a Fault Detection and Isolation (FDI) system and two control laws are proposed: Model Predictive Control (MPC) and Model Following Control (MFC). To develop the FDI system an adaptive nonlinear observer to estimate the flow rates in the heat exchanger for both streams (hot and cold) was implemented. The FDI system allows to detect and isolate the fault actuator, when the fault is located a reconfiguration of the control law and an accommodation of failure is performed. The results shown that it is possible to keep the heat exchanger in continuous operation even if the main actuator is stuck-open. Also an assessment of each of the proposed control laws in this work is done.

Índice general

Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	IX
Nomenclatura	X
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Hipótesis	4
1.4. Justificación	5
1.4.1. Alcances	5
1.5. Metodología	6
1.6. Organización del documento	6
2. Estado del arte y marco teórico	8
2.1. Estado del arte	8
2.1.1. Modelos para intercambiadores de calor (IC)	8
2.1.2. Diagnóstico de fallas	11
2.1.3. Sistemas de CTF en actuadores	18
2.1.4. Control Predictivo basado en Modelo (MPC)	21
2.1.5. Control por Modelo de Seguimiento (MFC)	26
2.2. Marco teórico	28
2.2.1. Intercambiadores de Calor (IC)	28
2.2.2. Detección y Diagnóstico de Fallas (FDD)	31
2.2.3. Sistema de Control Tolerante a Fallas (CTF)	35
2.2.4. Control Predictivo Basado en Modelo (MPC)	40
2.2.5. Control por Modelo de Seguimiento (MFC)	49
3. Modelado del intercambiador de calor (IC)	53
3.1. Modelado del intercambiador de calor (IC)	53
3.2. Metodología	56
3.2.1. Planta piloto del intercambiador de calor (IC)	56
3.3. Modelo dinámico de parámetros concentrados	58
3.3.1. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (U)	61

3.4.	Modelo dinámico de parámetros distribuidos	62
3.4.1.	Cálculo de los coeficientes convectivos (h_i , h_e) de transferencia de calor	63
3.5.	Resultados	64
3.5.1.	Validación del modelo de parámetros concentrados	65
3.5.2.	Validación del modelo de parámetros distribuidos	69
3.6.	Conclusión del modelado del intercambiador de calor	70
4.	CTF aplicado en un intercambiador de calor	72
4.1.	Observador adaptativo	73
4.2.	Control Predictivo Basado en Modelo (MPC)	75
4.2.1.	Desarrollo matemático del control predictivo	75
4.3.	Control por Modelo de Seguimiento (MFC)	83
4.3.1.	Desarrollo matemático del control por modelo de seguimiento	84
5.	Implementación del CTF	87
5.1.	CTF basado en Control Predictivo	87
5.2.	CTF basado en Control por Modelo de Seguimiento	89
6.	Conclusiones y trabajos futuros	92
6.1.	Conclusiones	92
6.2.	Trabajos futuros	93
6.3.	Publicaciones realizadas	93
Anexos		104
A.	Instrumentación del intercambiador de calor	105
B.	Caracterización de las válvulas de control	107
C.	Linealización del modelo no lineal del IC	109
D.	Interfaz gráfica en LabVIEW	112
E.	Publicaciones realizadas	114

Índice de figuras

2.1. Intercambiador de calor de tubos concéntricos o doble tubo.	29
2.2. Intercambiador de calor de tubos concéntricos en configuración de flujo en paralelo.	30
2.3. Diagrama de temperaturas del intercambiador de calor de tubos concéntricos en configuración de flujos en paralelo (Bell, 1983).	30
2.4. Intercambiador de calor de tubos concéntricos en configuración de flujo a contracorriente.	31
2.5. Diagrama de temperaturas del intercambiador de calor de tubos concéntricos en configuración de flujos a contracorriente (Bell, 1983).	32
2.6. Estructura general de un sistema de diagnóstico y detección de fallas basado en modelo.	35
2.7. Estructura general de un sistema de control tolerante a fallas (Patton, 1997).	36
2.8. Esquema de acomodación de la falla.	37
2.9. Esquema de la reconfiguración de una falla.	38
2.10. Estructura del controlador MPC.	48
2.11. Control por Modelo de Seguimiento.	49
3.1. Intercambiador de calor.	56
3.2. Tarjeta de adquisición de datos y convertidor de señal.	57
3.3. Diagrama de los tubos del intercambiador de calor.	57
3.4. Representación del intercambiador de calor de una celda.	58
3.5. Flujo de entrada del agua fría.	65
3.6. Leyenda opcional para lista de figuras	65
3.7. Comparación entre las temperaturas de salida estimadas por el modelo de parámetros concentrados y los datos obtenidos experimentalmente (El coeficiente global de transferencia de calor U es calculado con la ecuación (3.13)).	67
3.8. Comparación entre las temperaturas de salida estimadas por el modelo de parámetros concentrados y los datos obtenidos experimentalmente (El coeficiente global de transferencia de calor U es calculado con la ecuación (3.14)).	68
3.9. Comparación entre las temperaturas de salida estimadas por el modelo de parámetros distribuidos y los datos obtenidos experimentalmente.	70
4.1. Sistema FDI.	73
4.2. CTF basado en Control Predictivo.	75

4.3. Estructura del controlador MPC.	77
4.4. CTF utilizando Control por Modelo de Seguimiento	83
4.5. Control por modelo de seguimiento.	84
5.1. Resultados de la implementación del Control Predictivo	89
5.2. Resultados de la implementación del Control por Modelo de Seguimiento	91
B.1. Caracterización de la válvula de control de agua fría (Datos experimentales y aproximación).	108
B.2. Caracterización de la válvula de control de agua caliente (Datos experimentales y aproximación).	108
D.1. Interfaz gráfica (control).	113
D.2. Interfaz gráfica (monitoreo).	113

Índice de tablas

2.1. Dimensiones de las matrices y vectores.	49
3.1. Dimensiones del intercambiador de calor.	58
A.1. Valores del RTD Pt-100.	106
C.1. Parámetros utilizados para la linealización.	110

Nomenclatura

Notación

T	Temperatura ($^{\circ}C$).
V	Volumen (m^3).
C_p	Calor específico ($\frac{J}{kg}^{\circ}C$).
A	Área de transferencia de calor (m^2).
U	Coefficiente global de transferencia de calor ($\frac{W}{m^2}^{\circ}C$).
F	Flujo volumétrico ($\frac{m^3}{s}$).
r	Radio (m).
h	Coefficiente convectivo ($\frac{W}{m^2}^{\circ}K$).
L	Longitud del tubo (m).
Vel	Velocidad del fluido ($\frac{m}{s}$).
D	Diámetro (m).
t	Tiempo (s).
E	Espesor de la pared (m).

Letras griegas

ρ	Densidad del fluido ($\frac{kg}{m^3}$).
λ	Coefficiente de conductividad térmica ($\frac{W}{mK}$).
μ	Viscosidad dinámica ($\frac{kg}{ms}$).

Subíndices

f	Frío.
c	Caliente.
ent	Entrada.
sal	Salida.
e	Externo.
i	Interno.
p	Pared.
x	Posición axial.

Números adimensionales

Nu	Número de Nusselt.
Re	Número de Reynolds.
Pr	Número de Prandtl.

Capítulo 1

Introducción

Con el incremento del grado de dependencia de la sociedad moderna de los sistemas y procesos tecnológicos complejos (automóviles, aviones, trenes, redes de distribución y producción de energía, agua, etc.), su disponibilidad y correcto funcionamiento se han convertido en una necesidad, el incorrecto funcionamiento de algunos de los sistemas o procesos puede provocar pérdidas económicas, peligro para los operadores, inconvenientes para los usuarios, etc. Además, la automatización de los mismos mediante lazos de control automático, si bien ha permitido liberar a los operadores humanos de su control y operación manual, no los ha inmunizado frente a las fallas. Se entiende por falla todo cambio en el comportamiento de alguno de los componentes del sistema (desviación no permitida de alguna de sus propiedades o parámetros característicos) de manera que éste ya no puede satisfacer la función para la cual ha sido diseñado.

Los sistemas de control automático son susceptibles a las fallas pudiendo verse amplificadas por el lazo de control llegando a provocar su mal funcionamiento. Además, los lazos de control pueden ocultar las fallas evitando ser observados hasta alcanzar un grado tal que produzcan una avería irreparable que obligue a detener el sistema o proceso. Por ello existe una creciente necesidad e interés en desarrollar sistemas de control que puedan operar de forma aceptable incluso después de la aparición de una falla y que sean capaces de continuar operando aun con la falla o de parar el proceso antes de que se originen daños irreparables en el mismo. A este tipo de sistemas de control se les denomina tolerantes a fallas (Puig et al., 2004). La tolerancia a fallas se entiende

como la capacidad de un sistema de control para mantener los objetivos de control a pesar de la aparición de una falla, admitiéndose una cierta degradación en su operación.

En la bibliografía se consideran dos tipos de control tolerante a fallas: el pasivo y el activo. El primero de ellos, utiliza la propiedad que tienen los sistemas realimentados de hacer frente a perturbaciones, cambios en la dinámica del sistema e incluso fallas en el mismo. Un cambio inesperado en el sistema crea un efecto sobre el mismo que se transmite al sistema de control que a su vez trata de compensarlo de forma más o menos rápida. En este sentido, el control tolerante pasivo consiste en un diseño robusto del sistema de control realimentado para hacerlo inmune a determinadas fallas. Sin embargo, la teoría de control robusto muestra que sólo existen controladores robustos para una clase reducida de cambios en la dinámica del sistema provocados por las fallas. Además, un controlador robusto funciona de forma subóptima para la planta nominal puesto que sus parámetros se han obtenido mediante un compromiso entre prestaciones y robustez para toda la familia de plantas considerada, incluyendo las posibles fallas. Por otro lado, el control tolerante activo consiste en el diagnóstico en línea de la falla, es decir, en determinar el componente averiado, el tipo de avería, su tamaño e instante de aparición y a partir de dicha información, activar algún mecanismo de acomodación del mismo o de reconfiguración del control o incluso dependiendo de la gravedad el paro del sistema (Blanke et al., 2001).

Por otro lado, en la industria química, farmacéutica, alimentaria, etc., los intercambiadores de calor son ampliamente usados, ya sea para enfriar, calentar, condensar o evaporar. Este tipo de equipos también son susceptibles a fallas, por lo tanto la aparición de alguna falla en el intercambiador de calor puede tener como consecuencia la degradación del mismo a tal punto de que el proceso ya no cumpla con las condiciones de calidad requeridas, y en algunos casos pone en riesgo la integridad del usuario, por lo tanto, la detección y diagnóstico de fallas actuadores es una herramienta que permite aumentar la seguridad durante la operación de la planta.

1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad las necesidades de producción y estrictas especificaciones de desempeño y calidad son cada vez mayores, esto provoca una exigencia mayor en los requerimientos de operación de los procesos industriales, estos requisitos incrementan la probabilidad de que ocurran fallas en los sensores y/o actuadores y esto a su vez ocasiona el funcionamiento degradado del proceso de producción o en el peor de los casos el paro del mismo.

En el ámbito industrial se encuentran muchas situaciones físicas en las que es necesario transferir calor con múltiples propósitos. Por ejemplo, para llevar al fluido a una temperatura óptima, bien sea para un procesamiento posterior o para alcanzar condiciones de seguridad necesarias en el caso de transporte y/o almacenamiento.

Dadas las características de operación de los procesos continuos, las cuales implican grandes cantidades de producto terminado por unidad de tiempo, una falla en el proceso ocasionaría gastos por pérdidas o por paros no previstos en las operaciones de los equipos.

Por ejemplo en la industria alimentaria se utilizan intercambiadores de calor para el enfriamiento, termización y pasteurización de leche, jugos, bebidas carbonatadas, salsas, vinagres, vino, jarabe de azúcar, aceites, etc., y en la industria química y petroquímica donde son utilizados para la producción de combustibles, etanol, biodiesel, disolventes, pinturas, aceites industriales, etc., en ambos ejemplos una falla del equipo originaría tiempos muertos en el proceso y grandes pérdidas económicas ya que el producto final no cumpliría con los estándares de calidad requeridos, además podría ponerse en riesgo la integridad del usuario.

De esta problemática surge la necesidad de contar en las industrias con sistemas de control tolerantes a fallas, que permitan la detección y diagnóstico de fallas en línea, con la finalidad de que el sistema industrial no interrumpa su operación o trabaje en

modo degradado.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar e implementar un sistema de diagnóstico y control tolerante a fallas activo que permita detectar, localizar y estimar la falla en el actuador principal de un intercambiador de calor (IC).

1.2.2. Objetivos específicos

- Estudiar el comportamiento de un intercambiador de calor y la transferencia de calor.
- Modelar y representar un intercambiador de calor.
- Diseñar un sistema de detección y diagnóstico de fallas en actuadores para un intercambiador de calor.
- Diseñar una estrategia de control tolerante a fallas activo que permita que el intercambiador de calor continúe en funcionamiento aun con la presencia de fallas en su actuador principal.
- Simular la estrategia de control tolerante a fallas para el actuador principal de un intercambiador de calor.
- Implementar la estrategia de control tolerante a fallas para el actuador principal de un intercambiador de calor.

1.3. Hipótesis

Con la implementación de un control tolerante a falla activo en el actuador principal de un intercambiador de calor es posible mantener el sistema de transferencia de calor en operación continua en presencia de fallas.

1.4. Justificación

La aparición de fallas en un proceso industrial tiene como consecuencia la pérdida de productividad, calidad y en el peor de los casos poner en riesgo vidas humanas, por lo tanto, se utiliza el diagnóstico de fallas para aumentar la seguridad en procesos y sistemas. El diagnóstico de fallas debe ser rápido y preciso para así reducir el tiempo en que se detecta la aparición de una falla o fallas múltiples, las cuales pueden causar paros de proceso o sistema y/o accidentes.

El poder reducir y hacer frente a fallas en las industrias (alimentaria, química, petroquímica, etc.) es imprescindible para cualquiera de ellas que pretende tener un crecimiento sostenido, debido a que los procesos industriales son vulnerables a fallas y esto puede provocar que el sistema se comporte de manera anormal, o bien, causar el paro del mismo, por lo que en este trabajo se implementará una estrategia de control tolerante a fallas activo haciendo uso de la técnica de control predictivo basado en modelo y control por modelo de seguimiento, debido a que es importante que las industrias cuenten con sistemas de control tolerantes a fallas que proporcionen al proceso seguridad, eficiencia y continuidad, es decir, que el sistema continúe funcionando aun en presencia de fallas en su actuador principal manteniendo un desempeño aceptable que cumpla con los estándares de calidad requerido y además proteger la integridad del usuario.

1.4.1. Alcances

En este proyecto se estudia y desarrolla un modelo matemático del intercambiador de calor de tubos concéntricos con flujos a contracorriente y sin cambio de fase, mediante el cual se diseñará e implementará un sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas y un control tolerante a fallas activo para que se detecte, localice y estime la falla en el actuador principal de un intercambiador de calor para lograr que el sistema continúe funcionando aun en presencia de una falla.

1.5. Metodología

La metodología empleada para desarrollar este trabajo de tesis fue la siguiente:

1. Se realizó un análisis bibliográfico sobre modelos matemáticos de intercambiadores de calor, diagnóstico de fallas y control tolerante a fallas.
2. Se desarrolló el modelo matemático del intercambiador de calor.
3. Se realizó la simulación del modelo matemático del intercambiador de calor.
4. Se validó experimentalmente el modelo para poder comprobar que el modelo matemático representa correctamente a la planta.
5. Se seleccionó y diseñó el sistema de diagnóstico de fallas y control tolerante a fallas.
6. Se simuló el sistema de diagnóstico de fallas y control tolerante a fallas.
7. Se implementó el sistema de diagnóstico de fallas y control tolerante a fallas en el intercambiador de calor.
8. Finalmente se realizó la redacción de este trabajo de tesis.

1.6. Organización del documento

Este documento de tesis se encuentra dividido en seis capítulos, a continuación se describe brevemente el contenido de cada capítulo.

En el **Capítulo 2** se presenta la revisión del estado del arte y marco teórico sobre modelos matemáticos de intercambiadores de calor, detección de fallas, control tolerante a fallas, así como también sobre control por modelo de seguimiento y control predictivo.

En el **Capítulo 3** se presenta el desarrollo y la implementación de dos modelos matemáticos del intercambiador de calor y se presentan los experimentos realizados.

En el **Capítulo 4** se presenta el desarrollo matemático de las técnicas utilizadas para aplicar el sistema de control tolerante a fallas en el intercambiador de calor.

En el **Capítulo 5** se presentan los resultados de la implementación de un sistema de control tolerante a fallas aplicado en el actuador principal de un intercambiador de calor, se muestran dos esquemas de control para la implementación del CTF.

En el **Capítulo 6** se presentan las conclusiones de la implementación de las estrategias de control tolerante a fallas, los trabajos futuros y las publicaciones ligadas a la tesis.

Capítulo 2

Estado del arte y marco teórico

2.1. Estado del arte

2.1.1. Modelos para intercambiadores de calor (IC)

En la literatura se encuentran distintos trabajos que utilizan modelos matemáticos que describen el comportamiento dinámico de un intercambiador de calor (Escobar et al., 2011b; Escobar et al., 2009; Bagui et al., 2004; Luo et al., 2003; Rahman y Devanathan, 1994 y Malleswararao y Chidambaram, 1992).

En Escobar et al. (2011b) se presentó un modelo del intercambiador de calor donde es visto como una caja gris en la que algunos parámetros se consideran agrupados con el fin de simplificar todo el modelo, el intercambiador de calor se divide en pequeños elementos llamadas celdas. Las ecuaciones del modelo para una sola celda se deducen del balance de energía entre la corriente de agua fría y caliente. El objetivo de este trabajo es describir la implementación de un sensor basado en un observador para estimar las variables del proceso para el cual no está disponible un sensor físico. Se desarrollaron simulaciones numéricas y posteriormente pruebas experimentales en una planta piloto (intercambiador de calor) con el fin de validar el esquema propuesto. Se concluye que este modelo es suficiente para lograr objetivos de control, además las estimaciones realizadas por los observadores fueron similares con los cálculos obtenidos en simulación y con las mediciones experimentales desarrolladas en línea como una

prueba de validación complementaria.

En Escobar et al. (2009) se utilizó un modelo matemático para un intercambiador de calor de doble tubo con flujos a contracorriente, su modelo puede ser ilustrado como una celda simple la cual consiste de dos tanques perfectamente agitados con flujos de entrada y flujos de salida, lo cual es suficiente para estimar los estados con precisión, sin ser necesario un mayor número de celdas, lo cual es demostrado experimentalmente en este trabajo al ser estimado en línea el parámetro U . En el modelo matemático se toman en cuenta las siguientes suposiciones: los volúmenes de agua en el tubo y en la sección anular son constantes; el coeficiente de transferencia de calor U depende del flujo y de la temperatura de cada fluido, y no es considerado como constante; no hay transferencia de calor entre el tubo exterior y el medio ambiente; las propiedades físicas del agua son evaluadas en función de la temperatura mediante correlaciones empíricas; no hay almacenamiento de energía en las paredes del tubo; las entradas al sistema son medibles. De este trabajo se concluye que el coeficiente de transferencia de calor tiene dependencia de la temperatura y de la dinámica del flujo para estos fluidos. Al estimar el coeficiente de transferencia de calor para cada fluido y considerarlo en un modelo simplificado de una celda, es posible estimar los estados del sistema con un mínimo error.

En Bagui et al. (2004) los autores propusieron un modelo térmico simplificado con el fin de implementar un observador de Kalman para simular la transferencia de calor en el intercambiador de calor de tubo aislado, sin necesidad de los cálculos pesados necesarios en la resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes y ecuaciones de energía. Se consideran algunas suposiciones, los flujos se asumen como turbulentos y la velocidad longitudinal es el componente único. Usando las velocidades medias, el modelado de intercambiador de calor se limita sólo al balance de energía local y las propiedades térmicas de las paredes de las tuberías y los fluidos se suponen constantes. En este trabajo se aplica un filtro de Kalman adaptativo para el diseño de un observador usado para predecir los estados de un intercambiador de calor de flujos a contracorriente. Se concluye que la estimación de los estados del intercambiador de ca-

lor por medio del filtro de Kalman adaptativo fue adecuada, éste permite la predicción de las temperaturas en una posición de la planta dada de las condiciones iniciales.

En Luo et al. (2003) se mostró el comportamiento dinámico de un intercambiador de calor multicorriente, además es modelado y simulado. Se desarrolla un modelo linealizado para resolver problemas no lineales con pequeñas perturbaciones. El modelo lineal y el modelo linealizado para pequeñas perturbaciones se resuelve por medio de transformada de Laplace y algoritmos numéricos inversos. Se concluye que el modelo linealizado representa correctamente la dinámica del intercambiador de calor de flujo a contracorriente, asimismo se dan ejemplos para ilustrar el procedimiento a detalle.

En Rahman y Devanathan (1994) se presentó un modelo matemático de parámetros agrupados para un intercambiador de calor. Además se investigó la retroalimentación de estado dinámica para lograr la linealización por retroalimentación del modelo no lineal del intercambiador de calor. Se derivan las condiciones necesarias y suficientes para la linealización por retroalimentación. Los resultados fueron aplicados a un caso especial de un modelo para un intercambiador de calor y se complementó la teoría con un ejemplo donde se exhibió la linealización.

En Malleswararao y Chidambaram (1992) se describió un modelo simplificado para un intercambiador de fluido líquido donde la variable controlada es la temperatura de salida del fluido del proceso y la variable manipulada es la tasa de flujo del fluido de calentamiento. Este modelo se utilizó para la implementación de un controlador PID para el control de las temperaturas del proceso en el intercambiador de calor. El desempeño del control propuesto se evaluó en simulación, los resultados de la simulación mostraron la efectividad del controlador y su robustez ante errores de modelado y perturbaciones. Se concluye que el controlador PID desarrollado para el intercambiador de calor es robusto ante perturbaciones y errores de modelado, y además el procedimiento para su diseño es sencillo.

2.1.2. Diagnóstico de fallas

Los sistemas tecnológicos modernos se basan en sistemas de control sofisticados para satisfacer las nuevas necesidades de rendimiento y seguridad. Un diseño de control realimentado convencional para un sistema complejo puede resultar en un rendimiento insatisfactorio, o incluso la inestabilidad, en el caso de mal funcionamiento en los actuadores, sensores u otros componentes del sistema. Para superar estas debilidades, los nuevos enfoques para el diseño de sistemas de control se han desarrollado con el fin de tolerar el mal funcionamiento de los componentes, manteniendo las propiedades de estabilidad y rendimiento deseado. Esto es importante para los sistemas críticos para la seguridad, tales como aviones, naves espaciales, plantas de energía nuclear, y las plantas de procesamiento de materiales peligrosos, así como también para muchos procesos industriales, todo esto ha dado como resultado la implementación de sistemas de control como los sistemas de detección y diagnóstico de fallas (Agudelo et al., 2013). En algunos sistemas las consecuencias de una falla menor en algún componente del sistema puede tener consecuencias catastróficas. Por lo tanto, la demanda en la fiabilidad, la seguridad y tolerancia a fallos es alta. Por esto es necesario diseñar sistemas de control que son capaces de tolerar posibles fallas en estos sistemas con el fin de mejorar la fiabilidad y la disponibilidad mientras que proporciona un rendimiento deseable. Este tipo de sistemas de control son regularmente conocidos como Sistemas de Control Tolerante a Fallos (Zhang y Jiang, 2008). Las características de estos últimos sistemas es que pueden mantener un sistema o proceso operando aun y en la presencia de fallas, ya sea en sensores o en actuadores.

En la literatura se han reportados esquemas de diagnóstico de fallas en distintos sistemas o procesos, por ejemplo en (Valencia y Estupiñan, 2015; Airabella et al., 2015; Zamarron y Rodríguez, 2015; Rodríguez Aguilar et al., 2014; Anguiano et al., 2013; Flores y Asiaín, 2011; Villada y Cadavid, 2007; Camacho et al., 2007; Bolívar y García, 2005).

En Valencia y Estupiñan (2015) se desarrolló un sistema de diagnóstico de fallas fundamentado en lógica para mejorar la eficiencia del proceso y así evitar paros no pro-

gramados en la producción para aplicarlo en un generador de vapor. La metodología propuesta fue simulada, ejecutada y analizada entregando resultados satisfactorios. Se concluye que la lógica permitió una rápida detección de la falla considerando el diseño y los posibles tipos de averías que se pueden presentar en el proceso.

En Airabella et al. (2015) se analizó la operación de un convertidor $CC - CC$ cuando uno de los semiconductores de potencia presenta una condición de falla de circuito abierto. Se propuso una nueva estrategia de diagnóstico de falla, la cual consiste en medir la caída de tensión a bornes de cada uno de los semiconductores de potencia utilizando la información disponible en los circuitos de activación. La tensión medida se comparó con un valor de referencia para determinar si un semiconductor presenta una condición de circuito abierto. Se determinó qué señal puede aportar información sobre la falla, siendo esta última la caída de tensión en el dispositivo. Dado que la tensión en el mismo en estado de bloqueo puede ser tan alta como la tensión de alimentación de CC , se tuvo en cuenta esta característica al diseñar el circuito de medición.

En Zamarrón y Rodríguez (2015) se presentó la implementación de una nueva estrategia para el diagnóstico de fallas usando lógica difusa en motores de inducción alimentados por un accionador de CA . La identificación de la falla se basa en la corriente portadora de secuencia negativa inducida por la aplicación de una señal portadora de voltaje en los devanados del motor. El sistema difuso utiliza la magnitud del componente de CD de la corriente portadora de secuencia negativa para determinar las fallas por espiras en corto circuito y caída de fase del motor. Los experimentos se realizaron en un motor trifásico de inducción rebobinado especialmente para emular las fallas. Los resultados mostraron que el sistema propuesto es capaz de detectar fallas incipientes y severas sin importar el nivel de carga del motor.

En Rodríguez Aguilar et al. (2014) los autores presentaron una metodología de diseño de redes de sensores dedicada al monitoreo estadístico de procesos utilizando análisis de componentes principales (PCA). Los sensores se localizan de acuerdo al criterio de mínimo costo. La red de instrumentos obtenida además de identificar las

fallas estructuralmente también es capaz de detectarlas cuando se aplica dicha técnica estadística y las magnitudes de falla superan límites preespecificados. Se concluye que la estrategia de diseño óptimo de redes de sensores que se presentó en este trabajo satisface simultáneamente los criterios estructurales de observabilidad y resolución, y el de detectabilidad mediante el método de monitoreo PCA para un conjunto de fallas especificadas.

En Anguiano et al. (2013) se mostró el diseño e implementación de un sistema de detección y localización de fallas para un proceso de copolimerización en emulsión. El enfoque propuesto para el diseño de los generadores de residuos está basado en técnicas de desacoplo usando geometría diferencial y el uso de observadores no lineales de alta ganancia, en el cual cada uno de los residuos se encuentra dedicado a la detección y a la localización de una falla en particular. Las fallas que se consideraron en este trabajo son de tipo aditivo, presentes en los actuadores del proceso, que representan un mal funcionamiento de las bombas de alimentación de flujo de monómeros hacia el interior del reactor. Una de las principales ventajas del método propuesto son los observadores utilizados como generadores de residuos, los cuales son fáciles de implementar y de sencilla calibración, lo que favorece su aplicación en línea, además el esfuerzo de cómputo requerido es muy bajo y por consiguiente puede ser llevado fácilmente a una aplicación real en línea en trabajos posteriores. La eficacia del método se validó en simulación para el caso de un proceso de copolimerización en emulsión entre el acrilato de butilo y el estireno.

En Flores y Asiaín (2011) se mostró y aplicó una metodología para el diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas rotatorias utilizando la técnica de espectros de frecuencia de bandas laterales de las corrientes de fase. Se establecieron sistemas de prueba de laboratorio para verificar las magnitudes de las bandas originadas por fallas tanto mecánicas como eléctricas. Se mostraron una serie de resultados para un grupo motor de corriente directa-generator síncrono de 5 *kVA* desalineado y de dos motores de inducción de 5 *HP* tipo jaula de ardilla. Se obtuvieron resultados adecuados para detectar la presencia de falla en las máquinas, además la técnica presentada en el dominio de

la frecuencia para realizar el diagnóstico de fallas no fue destructiva y se realizó en línea.

En Villada y Cadavid (2007) se presentó un algoritmo para diagnosticar fallas entre espiras del estator de motores de inducción mediante la aplicación de redes neuronales artificiales (RNA). Los patrones de entrenamiento de las RNA fueron obtenidos a partir de un modelo de máquina que permite simular fallas internas bajo condiciones de carga y desequilibrio de tensión. Se realizaron pruebas experimentales en dos motores de 2 *HP* y 3 *HP*. Se concluye de los resultados experimentales que la fortaleza del algoritmo permitió detectar fallas incipientes en motores de inducción y mostró la factibilidad de implementar este método a nivel industrial.

En Camacho et al. (2007) se presentó el uso de técnicas estadísticas multivariantes tales como el Análisis Discriminante de Fisher (FDA) y el Análisis Discriminante Generalizado (GDA) para realizar el diagnóstico de fallas en un proceso industrial. La identificación de las fallas se realizó por medio del Análisis de pares FDA, que permitió seleccionar las variables más relacionadas con la falla. Un tanque de reacción no isotérmico agitado continuamente fue usado mediante simulación en presencia de fallas típicas, para estudiar las bondades del método propuesto. Después de realizar los experimentos se mostró la aplicabilidad del Análisis Discriminante Generalizado (GDA), para mejorar el diagnóstico de las fallas, en aquellos casos donde técnicas de clasificación lineales tales como el FDA no presentan buenos resultados. Adicionalmente los resultados obtenidos en la detección y diagnóstico de fallas del proceso, comprobaron la eficiencia del algoritmo propuesto, al mejorarse los resultados con errores de clasificación bajos.

En Bolívar y García (2015) se presentó un método para el diseño de filtros robustos para la detección y el diagnóstico de fallas en sistemas lineales a partir de un post-filtro, el cual se obtiene a través de la síntesis de controladores robustos basados en LMI. La construcción del filtro de detección se realizó en dos etapas a objeto de procurar, con un sólo sistema de filtraje, la detección y el aislamiento de múltiples fallas, en presencia de señales de perturbación e incertidumbres. La formulación permite la aplicación de

cualquier técnica de control robusto basada en LMI's. Se concluye que con la solución del problema de control se alcanza la estabilidad asintótica de la dinámica del error y se minimiza el efecto de las señales de perturbación externa. Cualquier método de síntesis de controladores basados en LMI's puede ser aplicado, incluyendo técnicas con criterios multi-objetivos.

Diagnóstico de fallas aplicado a intercambiadores de calor (IC)

En la literatura se han reportados esquemas de diagnóstico de fallas en procesos aplicados a intercambiadores de calor en (García-Morales, 2013; Escobar et al., 2011a; Enriquez-Gonzaga, 2011; López et al., 2009; López-Zapata, 2009; Jonsson et al., 2007 Persin y Tovornik, 2005; Weyer et al., 2000; y Spreitzer y Balle, 2000).

En García-Morales (2013) se presentó un esquema FDD aplicado a un intercambiador de calor de tubos concéntricos en configuración a contracorriente en modalidad de enfriador, utilizando como estimador de estados observadores por modos deslizantes de alto orden o super-twisting, cabe mencionar que estos observadores son robustos ante errores de modelado como también hacen frente a perturbaciones del sistema. Se observó que los esquemas de diagnóstico de fallas diseñados para el intercambiador de calor cumplieron con los objetivos especificados, es decir: la detección, localización y aislamiento de fallas, concluyendo que es posible enviar una señal de alarma o poner en aviso al operador del equipo en el momento que ocurra una falla.

En Escobar et al. (2011a) se abordó la detección y aislamiento de fallas (FDI) en sensores aplicado a un intercambiador de calor de tubos concéntricos con flujo a contracorriente. El FDI propuesto se basa en la redundancia analítica implementando observadores de alta ganancia no lineales que se utilizaron para generar los residuos cuando se presenta una falla en el sensor. Mediante la evaluación del residuo generado fue posible cambiar entre el sensor y el observador cuando se detecta una falla. Los experimentos realizados en la planta piloto del intercambiador de calor validaron la efectividad del enfoque. Se concluye que la técnica de FDI es fácil de implementar per-

mitiendo a las industrias tener una excelente herramienta para mantener sus procesos de transferencia de calor bajo supervisión.

En Enriquez-Gonzaga (2011) se presentó el estudio y la implementación de algoritmos de estimación, denominados observadores por modos deslizantes, en un intercambiador de calor de tubos concéntricos. Además se mostró un esquema de diagnóstico de fallas capaz de detectar, localizar y estimar las fallas en los sensores de temperatura de salida del sistema. Finalmente, con los resultados obtenidos después de realizar las pruebas con datos reales y las pruebas experimentales hechas en línea, se concluye que el esquema propuesto cumple con el objetivo de realizar la tarea de diagnóstico de fallas múltiples, aunque no simultáneas.

En López et al. (2009) se abordó el desarrollo de un método de diagnóstico de fallas en sensores con filtro de Kalman para la estimación de los estados y probabilidad de Bayes para la selección de la función de activación, este método aborda sistemas no lineales continuamente diferenciables mediante el enfoque multi-modelos, aplicado a un intercambiador de calor, se concluye que se tiene un enfoque que permite detectar, localizar, estimar las fallas y a la vez determinar la contribución de cada modelo por medio de la función de activación.

En López-Zapata (2009) se desarrolló un método de diagnóstico de fallas en sensores basado en multi-modelos utilizando filtros de Kalman desacoplados, con el residuo insensible a fallas que generaron los filtros y por medio de la probabilidad Bayesiana se obtuvo la estimación de la función de activación que da la contribución de cada modelo, y con el residuo sensible a fallas, se detectó, localizó y estimó la falla. El método de diagnóstico desarrollado se validó tanto en simulación como de manera experimental en un intercambiador de calor tipo tubos concéntricos. Se concluye que con el residuo sensible a fallas y el apoyo de la función de ponderación, se detecta, se localiza y se estima la falla o las fallas en el intercambiador de calor.

En Jonsson et al. (2007) se presentó un modelo en espacio que se utiliza para la

detección en línea de ensuciamiento en un intercambiador de calor. Los parámetros del modelo se estiman usando un filtro de Kalman extendido, además de las mediciones de las temperaturas de entrada y salida y los flujos volumétricos del intercambiador de calor, el ensuciamiento puede ser detectado incluso cuando el intercambiador de calor está operando en su estado transitorio, se concluye que el método propuesto es muy sensible, por lo tanto muy adecuado para la detección de ensuciamiento.

En Persin y Tovornik (2005) se realizó la aplicación de técnicas analíticas de detección de fallos a un intercambiador de calor. El sistema es no lineal y se propone una linealización basado en la velocidad antes de la generación de residuos, que se realiza utilizando un observador, y las ecuaciones de paridad. El sistema en cuestión es controlado por un controlador lógico programable y supervisado por el control de supervisión.

En Weyer et al. (2000) se propone un método basado en el modelo de caja gris para el diagnóstico de fallas. El método se basa en un modelo principal de la unidad de proceso, es decir, un intercambiador de calor, y en un modelo de caja gris de la falla, es decir, el deterioro de la superficie de transferencia de calor por el ensuciamiento. Durante las condiciones de funcionamiento normales, el coeficiente de transferencia de calor es constante o disminuye lentamente debido a la sedimentación de material sobre la superficie de transferencia de calor.

En Spreitzer y Balle (2000) se presentó un enfoque para la detección de fallas basada en modelos y el aislamiento (FDI) de los sensores y del proceso de fallas de los procesos no lineales. El proceso se descompone en varios subprocesos y para cada uno se identifica un modelo no lineal. Este método consiste en modelos difusos (tipo Takagi-Sugeno) que se utiliza para generar diferentes estimaciones para las salidas del proceso y de los estados. Al comparar estas estimaciones con las medidas reales se obtienen residuos que indican el estado del sistema y proporcionan información sobre el origen de las posibles fallas.

2.1.3. Sistemas de CTF en actuadores

El diagnóstico y detección de fallas es necesario para la aplicación del control tolerante a fallas el cual tiene como objetivo mantener los sistemas o procesos en condiciones continuas de operación con el objetivo de mantener la seguridad de los usuarios y de los equipos. En la literatura se han realizado distintos trabajos sobre control tolerante a fallas en actuadores, por ejemplo en (Yang et al., 2015; Liu et al., 2015; Zeng et al., 2015; Wang et al., 2015; Tong et al., 2014; Zhang y Yu, 2012; Benosman y Lum, 2010; Ocampo-Martinez et al., 2010; Jin et al., 2010 y Rodrigues et al., 2006.

En Yang et al. (2015) se presentó un sistema de control tolerante a fallas para una clase de sistemas no lineales interconectados con acoplamientos físicos reconfigurables, en este trabajo se proponen tres métodos diferentes de control tolerante a fallas: una estructura CTF de dos niveles; CTF bajo topología de acoplamiento fijo; CTF bajo topología de acoplamiento reconfigurado.

En Liu et al. (2015) se estudió un problema de control tolerante a fallas para una clase de sistemas con saltos Markovianos de tiempo continuo con fallas en actuadores, para resolver este problema de control el autor desarrolló un esquema de control adaptativo utilizando el método Backstepping.

En Zeng et al. (2015) se presentó un sistema de control tolerante a fallas adaptativo en actuadores para sistemas no lineales con actuadores múltiples. El diseño del controlador consiste en una ley de control adaptativa basada en aprendizaje, una ganancia Nussbaum y un esquema de función de conmutación. La ley de control adaptativa se implementó por una red neuronal de dos capas con el fin de acomodar la dinámica del sistema desconocido. La función de conmutación se diseñó para localizar automáticamente y apagar los actuadores con falla mediante la observación del índice de rendimiento de control.

En Wang et al. (2015) los autores proponen un método de control tolerante a fallas activo para sistemas lineales en tiempo discreto con fallas en actuadores. La principal

contribución de este trabajo radica en la capacidad de hacer frente a la saturación y la aceptación de la degradación de desempeño del actuador. Se diseñó un observador para la estimación de fallas. Para aceptar la degradación del desempeño del sistema post-falla, se introdujo un factor de degradación dentro del modelo de referencia. Finalmente, se simuló el ejemplo de un avión para demostrar la eficacia y el rendimiento del método propuesto.

En Tong et al. (2014) se investigó el problema del control tolerante a fallas (CTF) adaptativo descentralizado difuso para una clase de sistemas no lineales. El sistema no lineal considerado contiene funciones no lineales desconocidas, es decir, estados no medidos y falla en actuadores. Los resultados obtenidos en simulación muestran la efectividad del enfoque de control tolerante a fallas.

En Zhang y Yu (2012) se investigó un sistema de control tolerante a fallas para una clase de sistemas de tiempo discreto con retardo de tiempo variable y saturación en el actuador. El procedimiento de diseño del controlador se desarrolla mediante retroalimentación de estados el cual asegura la estabilidad exponencial del sistema en lazo cerrado. La efectividad del método propuesto se ilustra mediante un ejemplo numérico.

En Benosman y Lum (2010) se consideró un problema de control tolerante a fallas pasivo para sistemas no lineales con fallas en actuadores. Se trataron dos tipos de fallas, fallas aditivas y fallas de pérdida de eficacia. En cada caso, se propuso un controlador realimentado basado en Lyapunov, que asegura la estabilidad asintótica del sistema defectuoso, si el sistema nominal es asintóticamente estable. La efectividad del sistema de control tolerante a fallas se muestra en un ejemplo numérico de un helicóptero autónomo.

En Ocampo-Martinez et al. (2010) se presentó un sistema de control tolerante a fallas basado en separación de conjuntos. El esquema propuesto emplea una configuración estándar que consiste en un banco de observadores que se ajusta a las diferentes situaciones de falla que pueden ocurrir en la planta. Cada uno de estos observadores tiene un

error de estimación asociado con un comportamiento distintivo cuando un observador coincide con la situación de falla de la planta. Con la información de cada observador, el módulo de diagnóstico y aislamiento de fallas (FDI) es capaz de reconfigurar el lazo de control seleccionando el controlador adecuado de un banco de leyes de control precalculadas. La efectividad del enfoque de control se ilustra mediante un ejemplo numérico.

En Jin et al. (2010) se desarrolló un esquema de control adaptativo por retroalimentación de estados para resolver el problema de diseño de un sistema de control tolerante a fallas robusto para fallas en actuadores en sistemas lineales invariantes en el tiempo. Se presenta un modelo general y práctico de las fallas en el actuador. Mientras que las fallas eventuales en los actuadores son desconocidas, los esquemas adaptativos están dirigidos a estimar los límites inferior y superior de las fallas de atascamiento del actuador, así como para estimar la efectividad del control sobre los actuadores. Por lo tanto, basado en la información de los esquemas adaptativos, un controlador adaptativo está diseñado para compensar automáticamente los efectos de las fallas y las perturbaciones. Se proporciona un ejemplo para ilustrar la eficacia de la compensación de las fallas.

En Rodrigues et al. (2006) se desarrolló una estrategia de control tolerante a fallas activo para sistemas lineales de parámetros variables politópicos (LPV). Basado en un esquema de detección y aislamiento de fallas (FDI), el rediseño de los controladores se realiza en línea tanto en el caso libre de falla y el caso con fallas con el fin de mantener la estabilidad del sistema en lazo cerrado a pesar de las fallas en los actuadores. La efectividad y desempeño del método de CTF propuesto se ilustra mediante una simulación.

Sistemas de CTF en actuadores aplicado a IC

Respecto a trabajos en control tolerante a fallas aplicados a un intercambiador de calor tenemos que en (Guerrero-Sánchez, 2008) se presentó un sistema de control tolerante a fallas en sensores, actuadores y parámetros utilizando la técnica de control predictivo basado en modelo aplicado a un evaporador de cinco efectos utilizado en la industria azucarera. Se usa un modelo matemático simplificado de éste para sintetizar

el controlador, considerando 10 estados, 6 entradas y 2 perturbaciones y se desarrolla el controlador predictivo con base en el modelo linealizado discreto representado en espacio de estado. Las fallas empleadas consisten en atasco y saturación en actuadores, así como fallas internas del proceso (como fugas del producto o de vapor). Finalmente se presentan los resultados obtenidos para diversos casos del control predictivo basado en modelo.

2.1.4. Control Predictivo basado en Modelo (MPC)

El control predictivo basado en modelo (Model Predictive Control, MPC) se ha desarrollado considerablemente en las últimas décadas tanto en la industria como en la comunidad de investigación. Este éxito se debe a que el control predictivo basado en modelo es quizá la forma más general de formular el problema de control en el dominio del tiempo. El control predictivo integra control óptimo, control de procesos con tiempos muertos, procesos multivariados y utiliza las referencias futuras cuando están disponibles (Camacho and Bordons, 2004). El control predictivo se enmarca dentro de los controladores óptimos (Rossiter, 2013). El criterio a optimizar, o función costo, está relacionada con el comportamiento futuro del sistema. Este comportamiento futuro se predice a partir de un modelo dinámico, denominado modelo de predicción. El intervalo de tiempo futuro que se considera en la predicción y la optimización se denomina horizonte de predicción (Camacho and Bordons, 2012).

Se han realizado diversos trabajos utilizando control predictivo, por ejemplo en (Aufderheide et al., 2001; Kerrigan and Maciejowski, 1999).

En Aufderheide et al. (2001) se implementó una estrategia de control multi-modelo en una estructura de control predictivo basado en modelo. El diseño del modelo requiere el conocimiento mínimo de la planta, basado sobre el rango de las ganancias, constantes de tiempo dominantes y retrasos de tiempo. El ejemplo de aplicación para demostrar la efectividad de la estrategia propuesta es la reacción isotérmica Van de Vusse en un reactor continuo de tanque agitado.

En Kerrigan and Maciejowski (1999) este documento describe cómo se implementó un MPC con éxito como un controlador de tolerancia a fallas para un solo modelo de motor/hélice de un sistema de propulsión de la nave.

Control Predictivo como base de CTF

Además, el control predictivo ha sido de gran utilidad en el área del control tolerante a fallas, por ejemplo en (Patan, 2015; Ghesmat et al., 2015; Yang y Maciejowski, 2015; Cavalca et al., 2015; Witczak et al., 2015; Hu et al., 2014; Zhang et al., 2014; Lao et al., 2013; Miksch et al., 2008; Martínez, 2007; Prakash et al., 2005; Maciejowski y Jones, 2003; Ichtev et al., 2002; Maciejowski, 2000).

En Patan (2015) se desarrolló un control predictivo no lineal para una unidad de tanques. El controlador predictivo se diseñó por medio de una red neuronal recurrente que actúa como un predictor sólo un paso por delante. Luego, basándose en el predictor neuronal, la ley de control deriva la solución de un problema de optimización. El sistema de control está equipado con un bloque de diagnóstico de fallas. Cuando una falla en el sensor es aislada, el sistema determina el tamaño de la falla y, basado en esta información, el controlador se alimenta con un determinado valor de nivel del tanque. Fallas en actuadores y en el proceso pueden ser compensadas debido a la aplicación de un modelo de perturbación no medida.

En Ghesmat et al. (2015) se diseñó un módulo de detección y aislamiento de fallas (FDI) basado en los estados estimados del sistema. Un filtro de Kalman es la principal innovación del módulo FDI para identificar las fallas. El filtro de Kalman emplea un vector de estados aumentado para estimar los estados del sistema y fallas simultáneamente, además se utiliza un mecanismo de control para compensar los efectos indeseados de las fallas detectadas. Otra contribución de este trabajo es el diseño de un sistema de CTF usando el filtro de Kalman para estimar las fallas y mejorar la exactitud de los datos. Esto se logra mediante la aplicación de un algoritmo de fusión de datos y controlando el sistema mediante el controlador predictivo después de elimi-

nar los efectos de las fallas.

En Yang y Maciejowski (2015) se presentaron los componentes esenciales para un sistema de control tolerante a fallas, que son: la capacidad de representar el comportamiento del sistema después de la ocurrencia de una falla, y la capacidad para explotar esta representación para decidir las acciones de control. Se utilizaron procesos Gaussianos para el primero de los componentes, y el control predictivo basado en modelo para el segundo componente. Por lo tanto, se utilizaron los dos componentes para obtener la funcionalidad del control tolerante a fallas. La propuesta se ilustró con varios ejemplos realistas extraídos de control de vuelo.

En Cavalca et al. (2015) se propuso un método para acomodar fallas conmutando entre controladores robustos. A pesar de que cada controlador está diseñado para una falla en específico, el cambio de un modelo a otro puede llevar a la inviabilidad del problema de optimización. Por lo tanto para mitigar el problema de inviabilidad se presenta una técnica para relajar las restricciones de operación sobre las variables de control. Para ilustrar la metodología propuesta se incluye un caso de estudio mediante simulación numérica.

En Witczak et al. (2015) se presentó un sistema de control tolerante a fallas predictivo robusto para sistemas lineales de tiempo discreto. La cuestión crucial es mantener el estado del sistema en el interior de un conjunto invariante, el cual es un conjunto de estados que garanticen la estabilidad de la estrategia de control propuesta. El enfoque comienza con la estimación de la falla, y luego la falla es compensada con un controlador robusto. En el caso en el que la compensación de la falla no proporciona los resultados esperados, lo que significa que el estado actual no pertenece al conjunto invariante, se lleva a cabo una acción de control predictivo con el fin de mejorar el desempeño del sistema. Para mostrar la efectividad del método se aplicó el sistema de CTF a un sistema de dos tanques.

En Hu et al. (2014) se diseñó un sistema de control tolerante a fallas utilizando

control predictivo basado en modelo aplicado a un vehículo hipersónico. Se propone un método de reconfiguración del controlador basado en control predictivo con respecto a los nuevos comandos y fallas del sistema. Por último, se realizaron simulaciones para mostrar la eficacia del método de control propuesto.

En Zhang et al. (2014) se realizó un esquema de control tolerante a fallas basado en un modelo predictivo para procesos por lotes con perturbaciones desconocidas y fallas parciales en sus actuadores. Para desarrollar el control tolerante a fallas del proceso por lotes se trata primero en una representación no-mínima usando la transformación de espacio de estado. La efectividad del método propuesto se demuestra en la aplicación del CTF en la velocidad del actuador de inyección.

En Lao et al. (2013) se diseñó un controlador tolerante a fallas basado en control predictivo que pueda tratar eficazmente con una falla incipiente en el actuador. Este enfoque para el control tolerante a fallas combina las propiedades únicas de estabilidad y robustez del control predictivo basado en modelo. Los resultados teóricos se aplicaron a un proceso químico, y se simularon diferentes escenarios para demostrar que el método de control tolerante a fallas propuesto puede lograr la estabilidad del sistema y trata eficientemente una falla del actuador de control.

En Miksch et al. (2008) se investigó el control tolerante a fallas usando control predictivo con acomodación en línea para hacer frente a fallas en actuadores. Se abordan los problemas de viabilidad y gasto computacional que el sistema demanda. El controlador predictivo se prueba en tiempo real bajo fallas en actuadores de tipo saturación, atascamiento y de pérdida total.

En Martínez (2007) se aborda el tema del control en tiempo real de redes de alcantarillado (RTC) el cual desempeña un papel fundamental dentro de la gestión de los recursos hídricos relacionados con el ciclo urbano del agua y, en general, con su ciclo natural. Un adecuado diseño de control para de redes de alcantarillado evita impactos medioambientales negativos originados por inundaciones y/o alta polución producto de

condiciones meteorológicas extremas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que estas redes, además de su gran tamaño y cantidad de variables e instrumentación, son sistemas ricos en dinámicas complejas y altamente no lineales. Este hecho, unido a unas condiciones atmosféricas extremas, hace necesario utilizar una estrategia de control capaz de soportar todas estas condiciones. En este sentido, dentro del campo del RTC de redes de alcantarillado se destacan las estrategias de control predictivo basadas en modelo (MPC), las cuales son alternativas adecuadas para el control de configuraciones multivariable y de gran escala, aplicadas como estrategias de control global del sistema.

En Prakash et al. (2005) se diseñó un esquema de control predictivo tolerante a fallas activo para fallas en sensores y actuadores, integrando formulación en espacio de estados para el control predictivo y un método de detección y aislamiento de fallas (FDI), las ventajas del esquema propuesto se demostraron mediante estudios de simulación en un proceso CSTR y estudios experimentales realizados en el control de la temperatura de un sistema de calefacción de dos tanques acoplados.

En Maciejowski y Jones (2003) se demostró que el accidente fatal del vuelo 1862 pudo haberse evitado usando control tolerante a fallas mediante control predictivo basado en modelo. En simulaciones detalladas de un modelo no lineal se muestra que es posible volver a configurar el controlador de manera que la aeronave continúe volando con éxito hasta el nivel del suelo, sin entrar en el estado en que fallo.

En Ichtev et al. (2002) se diseñó un sistema de control tolerante a fallas para sistemas no lineales y se realizó la detección y aislamiento de fallas parciales. Además, se propone un método que combina controladores predictivos con modelos Takagi-Sugeno difusos. Para ilustrar la funcionalidad del enfoque propuesto se realiza un ejemplo numérico.

En Maciejowski (2000) se trabajó con control predictivo basado en modelo (MPC) el cual ofrece una base prometedora para el control tolerante a fallas. Debido a que el MPC se basa en un modelo interno explícito, que podría hacer frente a los fallas

mediante la actualización del modelo interno, y dejar que el optimizador encuentre en línea la manera de controlar el sistema en su nueva condición. Esto se basa en varios supuestos: que la naturaleza de la falla puede ser localizada, y sus efectos puedan ser modelados; que el modelo pueda ser actualizado, esencialmente automáticamente, y que los objetivos de control se dejen inalterados tras la falla. Esto puede ser posible usando un sistema de detección y diagnóstico de fallas (FDI) y el manejo de modelos complejos.

2.1.5. Control por Modelo de Seguimiento (MFC)

En el área de control, el Control por Modelo de Seguimiento (MFC) ha sido extensamente utilizado desde los años 70, por ejemplo en (Wang y Wu, 2015; Park et al., 2014; Taniguchi et al., 2014; Young, 1978; Winsor et al., 1970).

En Wang y Wu (2015) los autores diseñaron un sistema de control por modelo de seguimiento para un sistema de corte con retraso, el diseño fue realizado usando un algoritmo algebraico de matrices cuyos elementos son polinomiales. Se ilustra un ejemplo donde se verifica la viabilidad y validez de los resultados principales.

En Park et al. (2014) se presentó un algoritmo de conducción segura para una silla de ruedas eléctrica con un control por modelo de seguimiento. La viabilidad del algoritmo de conducción segura propuesto se verificó a través de simulaciones digitales.

En Taniguchi et al. (2014), se realizó un control por modelo de seguimiento de un robot móvil monociclo por medio de linealización de retroalimentación dinámica. Se realizaron simulaciones para mostrar la viabilidad y efectividad del esquema propuesto.

En Young (1978), se presentó el diseño para un control por modelo de seguimiento adaptativo, utilizando la teoría de sistemas de estructura variable y modos deslizantes. Se aborda el problema de control de un avión en el cual se realizó la comparación entre diversas técnicas de control por modelo de seguimiento, y de esta comparación se verificó el rendimiento del método propuesto.

En Winsor et al. (1970), se mostró un procedimiento para diseñar un control por modelo de seguimiento, el proceso de esta técnica tiene conceptos específicos de control óptimo y modelo de seguimiento perfecto, la técnica es usada cuando alguno de los estados no puede ser realimentado y cuando la planta está sujeta a incertidumbres en el modelado matemático. La viabilidad de la técnica de diseño se demostró mediante el diseño de un problema de control para una aeronave.

Control por Modelo de Seguimiento como base de CTF

Además, el control por modelo de seguimiento ha sido de gran utilidad en el área del control tolerante a fallas, por ejemplo en (Shibasaki et al., 2015; Cimpoeşu et al., 2011; Hua y Ding, 2011; Stengel y Huang, 1990;).

En Shibasaki et al. (2015) los autores presentaron un sistema de control por modelo de seguimiento el cual está basado en una función de conmutación donde la matriz de ganancia óptima está determinada por el método LQR. Los resultados de las simulaciones muestran varios casos incluyendo el sistema en funcionamiento nominal y el sistema en funcionamiento con falla. El esquema propuesto se aplicó a un motor de corriente continua. Los resultados en simulación y experimentales demuestran la efectividad del método propuesto por los autores.

En Cimpoeşu et al. (2011) se proponen dos esquemas de control reconfigurable basados en los principios de control por modelo de seguimiento, el enfoque de modelo de seguimiento implícito y el enfoque de modelo de seguimiento explícito. Se discuten las ventajas y desventajas de cada técnica y se proporciona un ejemplo de aplicación que muestra como el control por modelo de seguimiento explícito e implícito puede ser utilizado en sistemas de control tolerante a fallas (CTF) aplicado en aviones.

En Hua y Ding (2011) se presentó un esquema de control por modelo de seguimiento adaptativo robusto para una clase de sistemas interconectados con retrasos para

realizar un sistema de control tolerante a fallas (CTF). Los resultados obtenidos de distintas simulaciones demuestran el potencial del método propuesto.

En Stengel y Huang (1990) se diseñó un control reconfigurable usando un modelo de seguimiento proporcional-integral explícito. Esta investigación está enfocada para recuperar el desempeño de un sistema con actuadores fallados o con daño estructural, el resultado demuestra que el modelo de seguimiento es un buen candidato para la reconfiguración del controlador.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Intercambiadores de Calor (IC)

Los intercambiadores de calor son equipos que permiten la transferencia de energía térmica entre dos o más fluidos a diferentes temperaturas y son utilizados en una amplia variedad de aplicaciones. Algunas de las aplicaciones más comunes se encuentran en calentamiento, ventilación, sistemas de acondicionamiento de espacios, radiadores en máquinas de combustión interna, calderas, condensadores, y precalentadores o enfriamiento de fluidos. En la mayoría de estos dispositivos la transferencia de calor entre los fluidos se lleva a cabo a través de una superficie de intercambio y estos fluidos no se mezclan, sin embargo, existen algunos intercambiadores en los cuales la transferencia de calor se lleva a cabo mediante la mezcla de dichos fluidos. La superficie de intercambio, es la superficie del intercambiador de calor que está en contacto directo con los fluidos y a través de la cual se lleva a cabo la transferencia de calor. Entre mayor sea esta superficie de intercambio, mejor será la transferencia de calor.

Las principales aplicaciones de los intercambiadores de calor son:

- **Calentamiento:** Calentar un fluido frío mediante un fluido con mayor temperatura.
- **Enfriamiento:** Reducir la temperatura de un fluido mediante un fluido con menor temperatura.

Intercambiador de calor de tubos concéntricos

Los intercambiadores de calor de tubos concéntricos (Figura (2.1)) o de doble tubo son los más sencillos que existen, este tipo de intercambiadores de calor están constituidos por dos tubos concéntricos de diámetros diferentes. Si el objetivo del proceso es el enfriamiento: el fluido caliente fluye por el interior del tubo de menor diámetro y el fluido frío fluye por el espacio anular entre los dos tubos, pero si el objetivo del proceso es el calentamiento: el fluido frío fluye por el interior del tubo de menor diámetro y el fluido caliente fluye por el espacio anular entre los dos tubos.

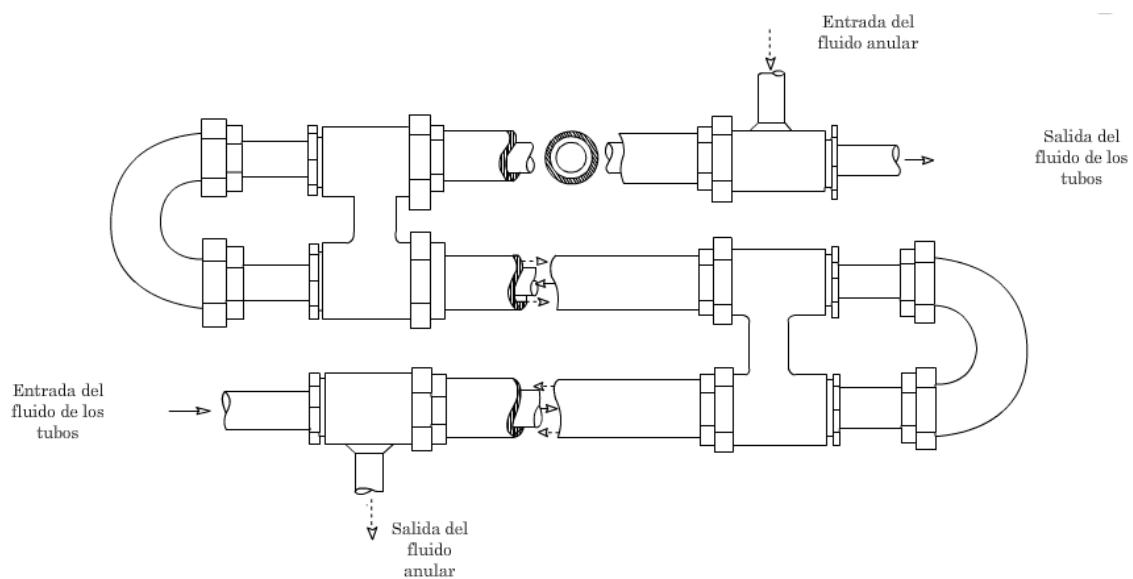


Figura 2.1: Intercambiador de calor de tubos concéntricos o doble tubo.

Ya que los intercambiadores de calor se presentan en muchas formas, tamaños, materiales de manufactura y modelos, estos son categorizados de acuerdo con características comunes. Una de las características comunes que se puede emplear es la dirección relativa que existe entre los dos flujos de fluido. Hay dos posibles configuraciones en cuanto a la dirección de los fluidos: en paralelo y a contracorriente.

Flujo en paralelo

La Figura (2.2) muestra la representación de un intercambiador de calor de tubos concéntricos en configuración de flujos en paralelo, el fluido caliente (fluido 1) circula por el tubo interno y el fluido frío (fluido 2) circula a través del tubo exterior, en este tipo de configuración ambos fluidos fluyen en la misma dirección y estos presentan una

diferencia de temperatura significativa. Como el calor se transfiere del fluido de mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura, la temperatura de los fluidos se aproximan, es decir que uno disminuye su temperatura y el otro la aumenta tratando de alcanzar el equilibrio térmico entre ellos.

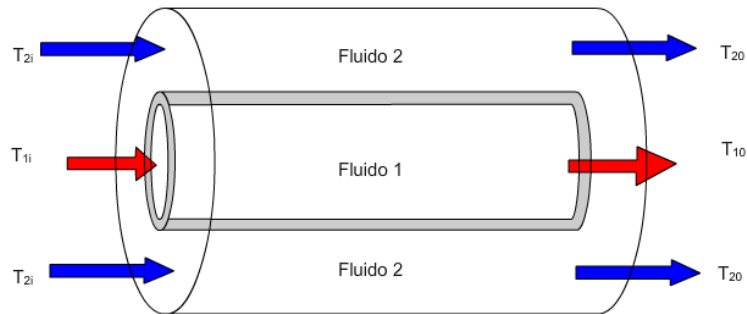


Figura 2.2: Intercambiador de calor de tubos concéntricos en configuración de flujo en paralelo.

A continuación la Figura (2.3) muestra el diagrama de distribución de las temperaturas del intercambiador de calor de tubos concéntricos en configuración de flujos en paralelo (la línea de color azul corresponde al fluido frío y la de color rojo corresponde al fluido caliente), se puede observar que la temperatura del fluido frío nunca alcanza la temperatura del fluido caliente y ninguno de los fluidos experimenta un cambio de fase.

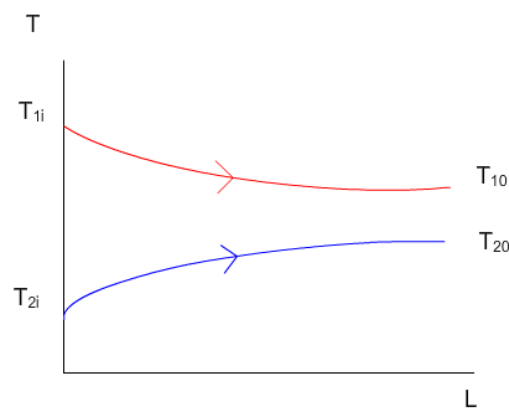


Figura 2.3: Diagrama de temperaturas del intercambiador de calor de tubos concéntricos en configuración de flujos en paralelo (Bell, 1983).

Flujo a contracorriente

La Figura (2.4) enseña la representación de un intercambiador de calor de tubos concéntricos en configuración de flujos a contracorriente, el fluido caliente (fluido 1) circula por el tubo interno y el fluido frío (fluido 2) circula a través del tubo exterior, en este tipo de configuración ambos fluidos fluyen en sentido opuesto, cada uno de los fluidos entra al intercambiador por diferentes extremos. Este tipo de configuración en flujo a contracorriente resulta ser más eficiente que la configuración de flujo en paralelo. En contraste con el intercambiador de calor de flujo paralelo, el intercambiador de contracorriente puede presentar la temperatura más alta en el fluido frío y temperatura más baja en el fluido caliente una vez realizada la transferencia de calor en el intercambiador.

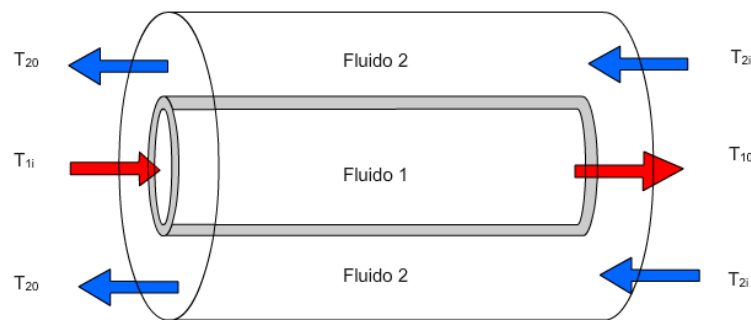


Figura 2.4: Intercambiador de calor de tubos concéntricos en configuración de flujo a contracorriente.

A continuación la Figura (2.5) muestra el diagrama de distribución de las temperaturas del intercambiador de calor de tubos concéntricos en configuración de flujos a contracorriente (la línea de color azul corresponde al fluido frío y la de color rojo corresponde al fluido caliente), ninguno de los fluidos experimenta un cambio de fase.

2.2.2. Detección y Diagnóstico de Fallas (FDD)

Una falla se define como cualquier tipo de mal funcionamiento en un sistema dinámico real (la planta), que conduce hacia una anomalía inaceptable en el comportamiento total del sistema. Dichas anomalías pueden ocurrir en: sensores, actuadores o el equipo.

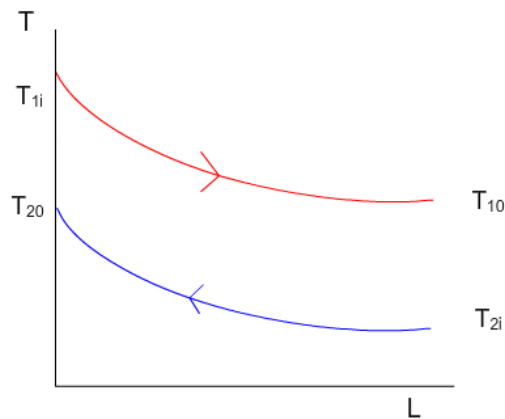


Figura 2.5: Diagrama de temperaturas del intercambiador de calor de tubos concéntricos en configuración de flujos a contracorriente (Bell, 1983).

La temprana detección de fallas puede ayudar a prevenir averías en equipos y catástrofes en las plantas. Es decir, permite planear las acciones de mantenimiento requeridas y disminuir el número de paros de emergencia de un proceso, los cuales son usualmente muy costosos.

El diagnóstico de fallas en un proceso dinámico, es una técnica encargada de detectar la presencia de fallas o comportamientos anormales en el proceso. También se encarga de identificar y localizar el componente o la causa que originó dicha anomalía.

Los objetivos de la detección y el diagnóstico de fallas son (Puig et al., 2004):

- **Detección de la falla:** es la determinación de la presencia de fallas en el sistema así como el instante de su aparición.
- **Localización de la falla:** determinación del tipo, localización e instante de detección de una falla. Se realiza después de la etapa de detección.
- **Estimación de la falla:** determinación del tamaño y comportamiento de la falla durante el tiempo.

De igual manera, se encuentra que las fallas se clasifican en tres clases (Höfling e Isermann, 1996):

- **Fallas de medición aditivas:** son discrepancias entre los valores reales y medidos de las entradas y salidas de la planta. Dichas fallas describen bien las desviaciones en las mediciones proporcionadas por los sensores, también pueden usarse para describir un mal funcionamiento en los actuadores.
- **Fallas de proceso aditivas:** son perturbaciones (entradas no medidas) actuando sobre la planta, las cuales causan una desviación en las salidas independientes de las entradas medidas.
- **Fallas de proceso multiplicativas:** son cambios (abruptos o graduales) de los parámetros de la planta. Tales fallas describen adecuadamente el deterioro del equipo de la planta.

El uso de una técnica de detección y diagnóstico de fallas para un proceso en particular, depende tanto de las características de dicho proceso como de las preferencias o necesidades del usuario. De acuerdo al tipo de falla los esquemas de diagnóstico se clasifican en (Zhang y Jiang, 2008):

- **Diagnóstico de falla en sensores** (IFD por sus siglas en inglés-Instrument Fault Detection)
- **Diagnóstico de falla en actuadores** (AFD por sus siglas en inglés-Actuator Fault Detection)
- **Diagnóstico de falla en componentes** (CFD por sus siglas en inglés-Component Fault Detection)

A grandes rasgos, los esquemas de detección y diagnóstico de fallas pueden realizarse empleando ya sea redundancia material o redundancia analítica estos conceptos se describen a continuación:

- **Redundancia material:** el enfoque tradicional de diagnóstico de fallas, hablando en un contexto amplio, se basa en métodos de redundancia física o de hardware, los cuales emplean múltiples sensores, actuadores, componentes de medición y control de una variable en particular. El mayor problema de este método es

el costo de mantenimiento y del equipo adicional, así como el espacio requerido para dichos instrumentos (Höfling e Isermann, 1996).

- **Redundancia analítica:** este esquema se basa en la diferencia generada por la comparación de valores disímiles medidos; esta diferencia se llama señal de residuo o síntoma. La mayor ventaja de un enfoque basado en modelos es que no requiere hardware adicional para realizar la detección de fallas y puede implementarse vía software, en un proceso controlado por computadora. La redundancia analítica que hace uso de un modelo matemático del sistema bajo investigación es referida frecuentemente como un enfoque basado en modelos.

De estas dos opciones, la redundancia analítica (basada en modelos) ha sido ampliamente usada en aplicaciones de sistemas industriales, ya que representa, dada la complejidad de los procesos analizados, un ahorro económico y de recursos durante el proceso de detección de fallas (Chen y Patton, 2012).

La figura (2.6) presenta la estructura general del esquema de diagnóstico y detección de fallas basado en modelo, el cual está compuesto por tres etapas: el modelado, la detección de fallas y el diagnóstico de fallas.

La metodología para evaluar la consistencia del sistema mediante modelos matemáticos puede dividirse en los siguientes pasos:

- **Generación de residuos:** consiste en obtener señales que contienen información únicamente de las fallas. Estas señales se llaman residuos. En el caso ideal los residuos son cero cuando no hay fallas y difieren de cero en presencia de falla.
- **Evaluación de residuos:** consiste en extraer la información contenida en los residuos obteniendo síntomas. La evaluación proporciona información específica de la falla (tiempo de ocurrencia y elemento afectado).
- **Decisión:** Con base en los síntomas obtenidos (que forman la firma de coherencia) se realiza una comparación con un patrón conocido (firma de referencia) para determinar si la falla existe o no y sus características.

Las técnicas de generación de residuos basados en modelos son:

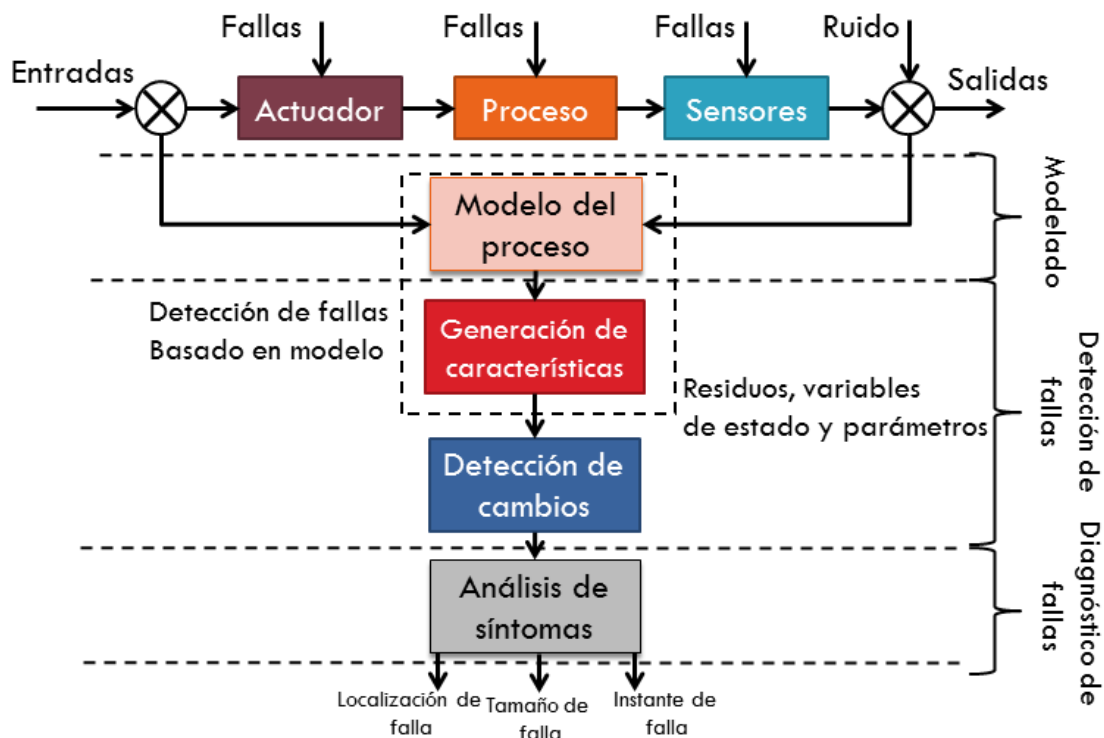


Figura 2.6: Estructura general de un sistema de diagnóstico y detección de fallas basado en modelo.

- Estimación de estados (Garcia y Frank, 1997).
- Estimación de parámetros (Höfling e Isermann, 1996).
- Estimación conjunta de estados y de parámetros (Zhang y Jiang, 2008).
- Ecuaciones de paridad (Gertler, 1998).

2.2.3. Sistema de Control Tolerante a Fallas (CTF)

En la bibliografía se consideran dos tipos de control tolerante a fallas (Puig et al., 2004): el control tolerante pasivo y el control tolerante activo. El primero de ellos consiste en un diseño robusto del sistema de control realimentado para hacerlo inmune a determinadas fallas (Patton, 1997). La tolerancia, en este caso, se basa en el diseño del controlador para que sea insensible (robusto) a un conjunto restringido de fallas. Las fallas son consideradas en la etapa de diseño del controlador y se diseña una única ley de control (funcionamiento normal o en falla), mientras que el control tolerante a

fallas activo consiste en el diagnóstico en línea de la falla, es decir, en determinar el componente averiado, el tipo de avería, su tamaño e instante de aparición y, a partir de dicha información, activar algún mecanismo de acomodación del mismo o de reconfiguración del control o incluso dependiendo de la gravedad, el paro del sistema, se realiza la toma de decisiones en tiempo real, así como la reconfiguración del controlador o acomodación de la falla.

La arquitectura general de un sistema de control tolerante a fallas activo se muestra en la figura (2.7) y tiene dos bloques elementales que se describen a continuación:

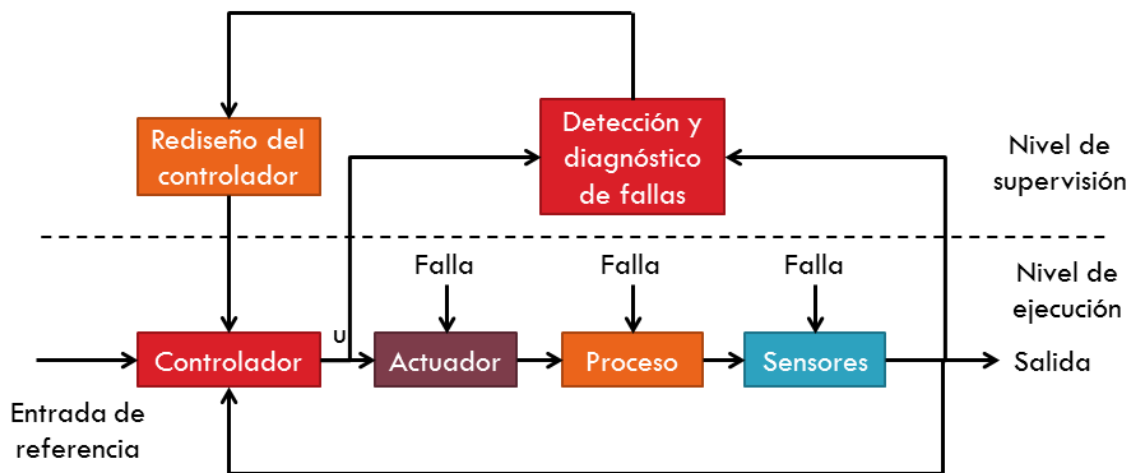


Figura 2.7: Estructura general de un sistema de control tolerante a fallas (Patton, 1997).

Detección y diagnóstico de fallas: mediante la evaluación de la consistencia de las mediciones de las entradas y las salidas, respecto a un modelo, se detectan e identifican las fallas, de una manera lo suficientemente precisa.

Rediseño del controlador: utilizando la información del bloque de detección y diagnóstico, se ajusta el controlador ante la situación de un sistema con presencia de fallas. El rediseño del controlador, puede resultar en nuevos parámetros para el controlador o en un nuevo controlador. Entonces, el anterior y el nuevo controlador pueden, no sólo diferir en los parámetros, sino en las señales de entrada y salida que utilizan.

Se pueden distinguir dos métodos de rediseño del controlador: la acomodación de la falla y la reconfiguración, los cuales se describen a continuación.

Acomodación de la falla

La Figura (2.8) muestra el esquema para la acomodación de una falla, en este esquema se realiza una acción correctora (basada en el cambio de operación del sistema) que evita que una cierta falla desemboque en un efecto final no deseado, es decir, se produce un cambio en los parámetros del controlador o en su estructura para evitar los efectos de una falla. Las entradas y/o salidas del controlador continúan siendo las mismas.

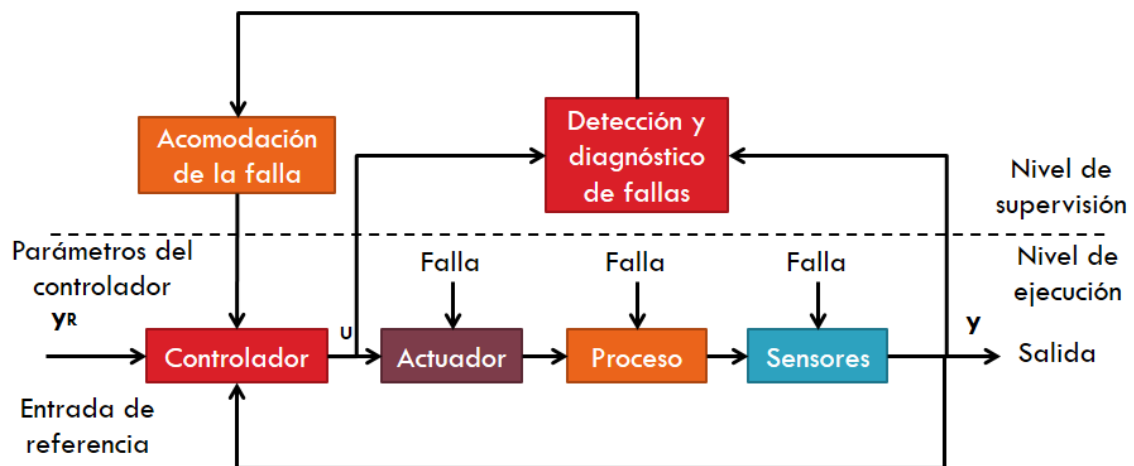


Figura 2.8: Esquema de acomodación de la falla.

Reconfiguración de la falla

Si la acomodación de la falla es imposible, el lazo de control debe ser reconfigurado por completo, esto incluye la formulación en línea de un nuevo control, donde señales alternativas de entrada y salida pueden ser utilizadas. La selección de estas señales depende de la existencia de fallas. La Figura (2.9) muestra un esquema general sobre reconfiguración, la cual es necesaria luego de la ocurrencia de diversas fallas que provoquen serios cambios estructurales en la dinámica de la planta como:

- **Falla en sensores:** se rompe el lazo entre la planta y el controlador, esto hace a la planta parcialmente inobservable, nuevas mediciones se deben utilizar para resolver la tarea de control.
- **Falla en actuadores:** estas perturban la operación de la planta, volviéndola parcialmente incontrolable, son necesarios nuevos actuadores.
- **Falla en la planta:** cambios en el comportamiento dinámico del proceso, si estos no pueden ser tolerados por cualquier ley de control, es necesario una reconfiguración del controlador.

La reconfiguración debe cumplir con ciertas restricciones:

- La reconfiguración del control debe hacerse en tiempo real.
- El proceso de diseño debe ser completamente automático.
- Los métodos utilizados deben garantizar una solución al problema de diseño, incluso si el desempeño no es óptimo.

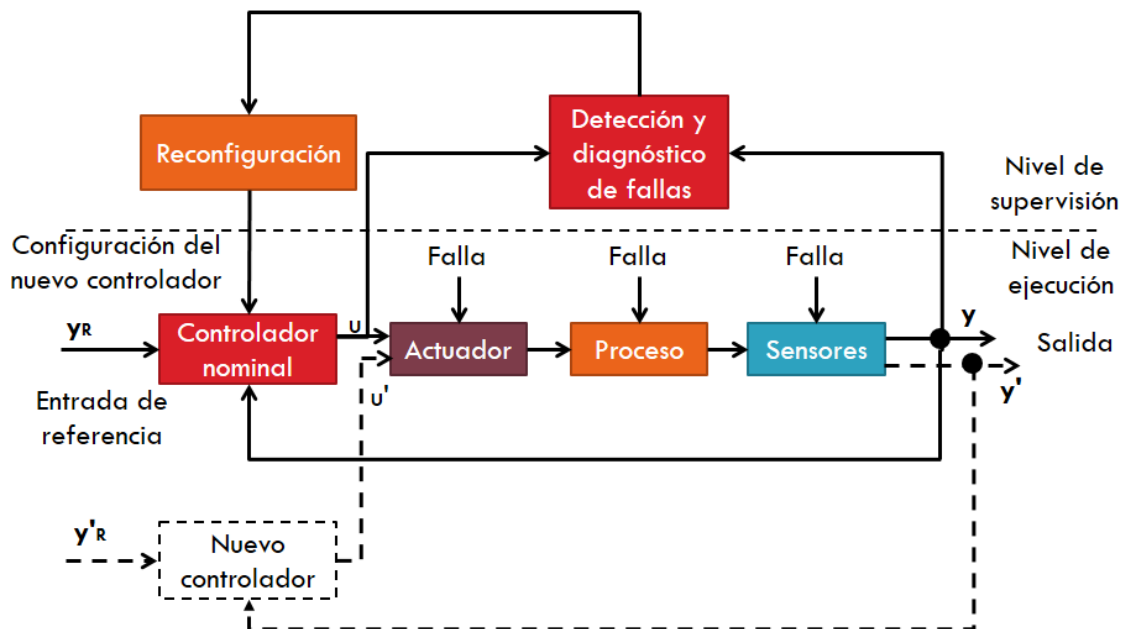


Figura 2.9: Esquema de la reconfiguración de una falla.

Relacionando la seguridad y la tolerancia a fallas en la región de desempeño requerido, un control permite mantener al sistema operando de manera nominal a pesar de

las perturbaciones e incertidumbres del modelo utilizado para su diseño, pero lo sigue haciendo aun cuando pequeñas fallas ocurren, sin ser su principal objetivo. En este caso el controlador “oculta” los efectos de las fallas, dificultando la labor de detección (Zhang y Jiang, 2008).

La región de desempeño degradado muestra dónde el sistema fallado se puede establecer, aunque se tenga una funcionalidad reducida. El sistema tolerante a fallas debe ser capaz de iniciar alguna acción de recuperación para prevenir una degradación mayor, hacia las regiones de desempeño inaceptable o de peligro, regresando el sistema a la región de desempeño requerido. En esta región el sistema de supervisión se encarga del diagnóstico de la falla y ajusta al controlador o al sistema para compensar las fallas.

Para evitar una degradación o daño mayor en el equipo y los usuarios, las fallas deben ser localizadas de manera rápida y realizar una acción para detener su propagación mediante otros elementos de decisión y control cuyo objetivo es hacer un sistema tolerante a fallas, con el cual el sistema es capaz de recuperar su operación luego de la ocurrencia de falla, con algún periodo de desempeño degradado, donde el algoritmo permite adaptar el sistema a la falla para recuperar su desempeño requerido.

Los elementos que debe tener un sistema de control tolerante a fallas son los siguientes:

- **Seguridad:** un sistema de seguridad, es una parte del equipamiento de control que protege al sistema de un daño permanente. Habilita un control que apaga el proceso, utilizando la información de señales críticas, se activan actuadores que detienen el proceso si cierta condición es alcanzada, se le denomina sistema a prueba de fallas.
- **Disponibilidad:** es la probabilidad de que un sistema se encuentre operacional cuando sea necesario. Contrario a la fiabilidad, éste depende de las políticas de mantenimiento.
- **Fiabilidad:** es la probabilidad de que el desempeño de un sistema se mantenga

de manera requerida por un periodo de tiempo bajo condiciones normales.

- **Confiabilidad:** es la unión de los tres anteriores, ya que un sistema confiable es un sistema a prueba de fallas con alta disponibilidad y confiabilidad.

Un sistema de control tolerante a fallas es un sistema que posee la habilidad de mantener la estabilidad del sistema y un desempeño aceptable en presencia de fallas.

2.2.4. Control Predictivo Basado en Modelo (MPC)

El MPC se enmarca dentro de los controladores óptimos. El criterio a optimizar, o función de costo, está relacionado con el comportamiento futuro del sistema. Este comportamiento futuro se predice a partir de un modelo dinámico, denominado modelo de predicción. El intervalo de tiempo futuro que se considera en la predicción y la optimización se denomina horizonte de predicción.

Ya que los problemas de optimización se resuelven respecto a una variable, en el caso del control predictivo las variables de decisión respecto a las que se optimiza son las entradas del sistema. La aplicación de la entrada óptima sobre el sistema conducen a un control en lazo abierto, pero mediante la técnica de horizonte deslizante se proporciona al sistema una retroalimentación del mismo.

La técnica de horizonte deslizante consiste en aplicar las entradas obtenidas de la predicción y la optimización solamente durante un instante de tiempo, tras el cual se muestrea el estado del sistema y se resuelve nuevamente el problema de optimización. De esta manera el horizonte de predicción se va deslizando a lo largo del tiempo.

Formulación básica del MPC

Para la formulación del control predictivo se asume que el modelo de la planta es lineal e invariante en el tiempo, que la función costo es cuadrática, y que las restricciones son en forma de desigualdades lineales. Además, la función costo no penaliza valores particulares del vector de entrada $u(k)$, solamente cambios en el vector de entrada $\Delta u(k)$.

El control predictivo está formado por los siguientes elementos (Camacho y Alba, 2013):

Modelo de predicción: es el modelo matemático que describe el comportamiento esperado del sistema. Este modelo es usado para predecir el comportamiento de la planta, a partir del tiempo actual, sobre el horizonte de predicción futuro. En este trabajo se consideran modelos lineales en espacio de estado, en tiempo discreto, de la forma mostrada en (2.1).

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\y(k) &= C_y x(k) \\z(k) &= C_z x(k)\end{aligned}\tag{2.1}$$

donde x es un vector de estados n – *dimensional*, u es un vector de entradas l – *dimensional*, y es un vector de salidas medidas m_y – *dimensional* y z es un vector de salidas controladas m_z – *dimensional*. Las variables en y y z normalmente serán las mismas, por lo que se asume $y \equiv z$; y entonces C denotará a C_y y C_z , y m denotará a m_y y m_z . El índice k identifica el instante de tiempo.

Función costo: es la función que indica el criterio a optimizar y es una función definida positiva. La función costo V penaliza las desviaciones de las salidas controladas predichas $\hat{z}(k+i|k)$ de una trayectoria de referencia $r(k+i|k)$, así como cambios en el

vector de entrada $\Delta\hat{u}(k+i|k)$. La función costo está definida en (2.2).

$$V(k) = \sum_{i=H_w}^{H_p} \|\hat{z}(k+i|k) - r(k+i|k)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \|\Delta\hat{u}(k+i|k)\|_{R(i)}^2 \quad (2.2)$$

El horizonte de predicción tiene longitud H_p , pero no necesariamente se empieza a penalizar las desviaciones de z de r inmediatamente (si $H_w > 1$), ya que puede existir algún retardo entre la aplicación de la entrada y la aparición de algún efecto. H_u es el horizonte de control y se asume que $H_u \leq H_p$, y que $\Delta\hat{u}(k+i|k) = 0$ para $i \geq H_u$, tal que $\hat{u}(k+i|k) = \hat{u}(k+H_u-1|k)$ para toda $i \geq H_u$.

La forma de la función costo implica que el vector de error $\hat{z}(k+i|k) - r(k+i|k)$ es penalizado por la matriz $Q(i)$ en cada punto del horizonte de predicción y éste es el caso más común. Pero es posible penalizar el error solo en algunos instantes de tiempo, haciendo $Q(i) = 0$ para algunos valores de i . Además, también es posible penalizar diferentes elementos del vector de error, es decir, penalizar ciertos estados del sistema y otros no, haciendo cero los elementos correspondientes de la matriz de ponderación $Q(i)$. Por lo tanto $Q(i) \geq 0$ y no necesariamente $Q(i) > 0$. Lo mismo ocurre para las penalizaciones para el vector de entradas, es decir que $R(i) \geq 0$ ya que en algunos casos pueden no penalizarse cambios en la señal de control.

Modelo de Predicción

Supongamos que todos los estados del vector de estados son medidos, es decir $\hat{x}(k|k) = x(k) = y(k)(C = I)$, además, que no se conoce nada acerca de ninguna perturbación o ruido de medición. Entonces la predicción del estado del sistema \hat{x} se hace a partir de (2.3):

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \hat{x}(k+1|k) \\ \vdots \\ \hat{x}(k+H_u|k) \\ \hat{x}(k+H_u+1|k) \\ \vdots \\ \hat{x}(k+H_p|k) \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} A \\ \vdots \\ A^{H_u} \\ A^{H_u+1} \\ \vdots \\ A^{H_p} \end{bmatrix}}_{\Psi} x(k) + \underbrace{\begin{bmatrix} B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_u-1} A^i B \\ \sum_{i=0}^{H_u} A^i B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_p-1} A^i B \end{bmatrix}}_{\Upsilon} u(k-1) \\
& \underbrace{\begin{bmatrix} B & \cdots & 0 \\ AB+B & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_u-1} A^i B & \cdots & B \\ \sum_{i=0}^{H_u} A^i B & \cdots & AB+B \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_p-1} A^i B & \cdots & \sum_{i=0}^{H_p-H_u} A^i B \end{bmatrix}}_{\Theta} \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}(k|k) \\ \vdots \\ \Delta \hat{u}(k+H_u-1|k) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Las predicciones de las salidas medidas z se obtienen como se muestran en (2.4):

$$\begin{bmatrix} z(k+1|k) \\ z(k+2|k) \\ \vdots \\ z(k+H_p|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_z & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & C_z & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & C_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}(k+1|k) \\ \vdots \\ \hat{x}(k+H_p|k) \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

Problema de control predictivo sin restricciones

Retomando la función costo (2.2), la podemos reescribir como:

$$V(k) = \|\mathcal{Z}(k) - \mathcal{T}(k)\|_Q^2 + \|\Delta \mathcal{U}(k)\|_{\mathcal{R}}^2 \tag{2.5}$$

donde

$$\mathcal{Z}(k) = \begin{bmatrix} z(k + H_w|k) \\ \vdots \\ z(k + H_p|k) \end{bmatrix} \quad \Delta\mathcal{U}(k) = \begin{bmatrix} \Delta\hat{u}(k|k) \\ \vdots \\ \Delta\hat{u}(k + H_u - 1|k) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\mathcal{T}(k) = \begin{bmatrix} \hat{r}(k + H_w|k) \\ \vdots \\ \hat{r}(k + H_p|k) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

y las matrices de ponderación \mathcal{Q} y \mathcal{R} están dadas por

$$\mathcal{Q} = \begin{bmatrix} Q(H_w) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Q(H_w + 1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Q(H_p) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\mathcal{R} = \begin{bmatrix} R(0) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & (1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & R(H_u - 1) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Ahora retomando (2.3) y (2.4), \mathcal{Z} tiene la forma dada en (2.10):

$$\mathcal{Z}(k) = \Psi x(k) + \Upsilon u(k - 1) + \Theta \Delta\mathcal{U}(k) \quad (2.10)$$

se define también:

$$\mathcal{E}(k) = \mathcal{T}(k) - \Psi x(k) - \Upsilon u(k - 1) \quad (2.11)$$

La ecuación (2.11) puede ser vista como el error de seguimiento, en el sentido que es la diferencia entre la trayectoria de referencia y la respuesta libre del sistema, es decir, la respuesta que ocurriría sobre el horizonte de predicción si no se hicieran cambios en la entrada. Ahora se tiene:

$$V(k) = \|\Theta \Delta\mathcal{U}(k) - \mathcal{E}(k)\|_{\mathcal{Q}}^2 + \|\Delta\mathcal{U}(k)\|_{\mathcal{R}}^2 \quad (2.12)$$

$$= [\Delta\mathcal{U}(k)^T \Theta^T - \mathcal{E}(k)^T] \mathcal{Q} [\Theta \Delta\mathcal{U}(k) - \mathcal{E}(k)] + \Delta\mathcal{U}(k)^T \mathcal{R} \Delta\mathcal{U}(k) \quad (2.13)$$

$$= \mathcal{E}(k)^T \mathcal{Q} \mathcal{E}(k) - 2\Delta\mathcal{U}(k)^T \Theta^T \mathcal{Q} \mathcal{E}(k) + \Delta\mathcal{U}(k)^T [\Theta^T \mathcal{Q} \Theta + \mathcal{R}] \Delta\mathcal{U}(k) \quad (2.14)$$

donde (2.14) toma la forma dada en (2.15):

$$V(k) = \text{constante} - \Delta\mathcal{U}(k)^T \mathcal{G} + \Delta\mathcal{U}(k)^T \mathcal{H} \Delta\mathcal{U}(k) \quad (2.15)$$

donde

$$\mathcal{G} = 2\Theta^T \mathcal{Q} \mathcal{E}(k) \quad (2.16)$$

y

$$\mathcal{H} = \Theta^T \mathcal{Q} \Theta + \mathcal{R} \quad (2.17)$$

donde \mathcal{G} y \mathcal{H} no dependen de $\Delta\mathcal{U}(k)$

Para encontrar la señal óptima $\Delta\mathcal{U}(k)$ se encuentra el gradiente de $V(k)$ y se iguala a cero. De (2.15) se tiene que:

$$\nabla_{\Delta\mathcal{U}(k)} V = -\mathcal{G} + 2\mathcal{H} \Delta\mathcal{U}(k) \quad (2.18)$$

Entonces el conjunto óptimo de cambios futuros en la entrada está dado por (2.19)

$$\Delta\mathcal{U}(k)_{opt} = \frac{1}{2} \mathcal{H}^{-1} \mathcal{G} \quad (2.19)$$

Ahora si bien (2.19) nos garantiza un punto estacionario, no es suficiente para garantizar un mínimo. Para garantizar un mínimo se utiliza la diferenciación del gradiente

$\nabla_{\Delta\mathcal{U}(k)}V$ con respecto a $\Delta\mathcal{U}(k)$, es decir el *Hessiano* de $V(k)$:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial \Delta\mathcal{U}(k)^2} = 2\mathcal{H} = 2(\Theta^T \mathcal{Q}\Theta + \mathcal{R}) \quad (2.20)$$

Asumiendo que $Q(i) \geq 0$ para cada i , entonces esto asegura que $\Theta^T \mathcal{Q}\Theta \geq 0$. Además ya que $R \geq 0$, entonces cuando $\mathcal{R} = 0$ se tiene que asegurar que $\Theta^T \mathcal{Q}\Theta \geq 0$ y en casos intermedios, es decir, cuando ambas sean semidefinidas positivas se tiene que asegurar que $\Theta^T \mathcal{Q}\Theta + \mathcal{R} > 0$.

Solamente se usa la parte de esta solución correspondiente al primer instante de tiempo, de acuerdo con la estrategia de horizonte deslizante. Entonces si la planta tiene l entradas, entonces se utilizarán l filas del vector $\Delta\mathcal{U}(k)_{opt}$. Esto se puede representar como:

$$\Delta u(k)_{opt} = \underbrace{[I_l, 0_l, \dots, 0_l]}_{H_u - 1 \text{ veces}} \Delta\mathcal{U}(k)_{opt} \quad (2.21)$$

donde I_l es una matriz identidad de $l \times l$, y 0_l es una matriz de ceros de $l \times l$. $\Delta\mathcal{U}(k)_{opt}$ es la solución del problema de control sin restricciones que será aplicado a la planta en el tiempo k .

Problema de mínimos cuadrados

La solución óptima presentada en (2.19) nunca debería calcularse por la inversa de \mathcal{H} ya que la matriz Θ está a menudo mal condicionada, lo que implica que \mathcal{H} esté mal condicionado. Por lo tanto, la mejor forma de encontrar la solución al problema de control es resolviendo el problema por mínimos cuadrados.

Entonces ya que $\mathcal{Q} \geq 0$ y $\mathcal{R} \geq 0$, se pueden encontrar matrices \mathcal{S}_Q y \mathcal{S}_R las cuales son sus raíces cuadradas:

$$\mathcal{S}_Q^T \mathcal{S}_Q = \mathcal{Q} \quad \mathcal{S}_R^T \mathcal{S}_R = \mathcal{R}$$

Ahora considerando el vector

$$\begin{bmatrix} \mathcal{S}_{\mathcal{Q}}\{\Theta\Delta\mathcal{U}(k) - \mathcal{E}(k)\} \\ \mathcal{S}_{\mathcal{R}}\Delta\mathcal{U}(k) \end{bmatrix}$$

Se tiene que la longitud al cuadrado del vector, es decir, la suma al cuadrado de sus elementos es la misma que la función costo $V(k)$, entonces $\Delta\mathcal{U}(k)_{opt}$ es el valor de $\Delta\mathcal{U}(k)$ que minimiza su longitud.

$$\begin{aligned} \left\| \begin{bmatrix} \mathcal{S}_{\mathcal{Q}}\{\Theta\Delta\mathcal{U}(k) - \mathcal{E}(k)\} \\ \mathcal{S}_{\mathcal{R}}\Delta\mathcal{U}(k) \end{bmatrix} \right\|^2 &= \left\| \begin{bmatrix} \mathcal{S}_{\mathcal{Q}}\{\mathcal{Z}(k) - \mathcal{T}(k)\} \\ \mathcal{S}_{\mathcal{R}}\Delta\mathcal{U}(k) \end{bmatrix} \right\|^2 \\ &= [\mathcal{Z}(k) - \mathcal{T}(k)]^T \mathcal{S}_{\mathcal{Q}}^T \mathcal{S}_{\mathcal{Q}} [\mathcal{Z}(k) - \mathcal{T}(k)] \\ &\quad + \Delta\mathcal{U}(k)^T \mathcal{S}_{\mathcal{R}}^T \mathcal{S}_{\mathcal{R}} \Delta\mathcal{U}(k) \\ &= \left\| \mathcal{Z}(k) - \mathcal{T}(k) \right\|_{\mathcal{Q}}^2 + \left\| \Delta\mathcal{U}(k) \right\|_{\mathcal{R}}^2 \\ &= V(k) \end{aligned}$$

Entonces $\Delta\mathcal{U}(k)_{opt}$ es la solución de la ecuación

$$\begin{bmatrix} \mathcal{S}_{\mathcal{Q}}\{\Theta\Delta\mathcal{U}(k) - \mathcal{E}(k)\} \\ \mathcal{S}_{\mathcal{R}}\Delta\mathcal{U}(k) \end{bmatrix} = 0$$

o equivalentemente:

$$\begin{bmatrix} \mathcal{S}_{\mathcal{Q}} \\ \mathcal{S}_{\mathcal{R}} \end{bmatrix} \Delta\mathcal{U}(k) = \begin{bmatrix} \mathcal{S}_{\mathcal{Q}}\mathcal{E}(k) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ecuaciones de la forma $A\Theta = b$ pueden resolverse en el sentido de mínimos cuadrados usando el algoritmo 'QR'. En Matlab la solución por mínimos cuadrados es obtenida usando el operador 'barra invertida', por lo que usando la notación de Matlab se tiene que la solución al problema de control por mínimos cuadrados es:

$$\Delta\mathcal{U}(k) = \begin{bmatrix} \mathcal{S}_{\mathcal{Q}}\mathcal{E}(k) \\ 0 \end{bmatrix} \setminus \begin{bmatrix} \mathcal{S}_{\mathcal{Q}} \\ \mathcal{S}_{\mathcal{R}} \end{bmatrix}$$

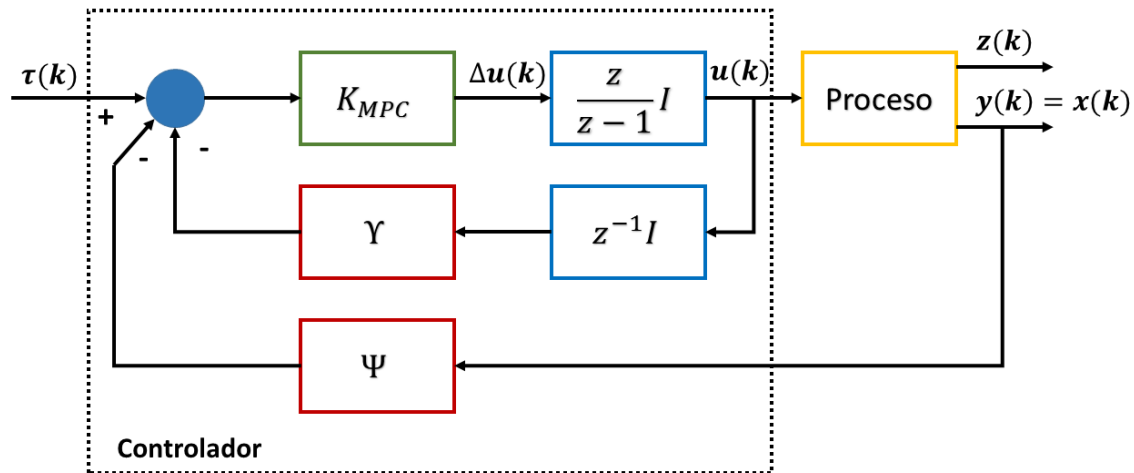


Figura 2.10: Estructura del controlador MPC.

Estructura del controlador sin restricciones

Retomando (2.21) y escribiéndola como

$$\Delta \mathcal{U}(k)_{opt} = [I_l, 0_l, \dots, 0_l] \mathcal{H}^{-1} \Theta^T \mathcal{Q} \mathcal{E}(k)$$

Se puede observar que la única parte de esta solución que cambia a cada instante de tiempo es el error de seguimiento $\mathcal{E}(k)$. Por lo que la estructura del controlador predictivo, para el problema sin restricciones se presenta en la Figura (2.10).

Donde el bloque titulado K_{MPC} está definido como:

$$K_{MPC} = [I_l, 0_l, \dots, 0_l] \mathcal{H}^{-1} \Theta^T \mathcal{Q} \quad (2.22)$$

y usando la notación de Matlab se tiene que

$$K_{MPC} = [I_l, 0_l, \dots, 0_l] \begin{bmatrix} \mathcal{S}_{\mathcal{Q}} \Theta \\ \mathcal{S}_{\mathcal{R}} \end{bmatrix} \setminus \begin{bmatrix} \mathcal{S}_{\mathcal{Q}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Así, este controlador es un sistema lineal invariante en el tiempo.

La Tabla (2.1) muestra las dimensiones de las matrices:

Donde l son las entradas, n los estados y m las salidas controladas del sistema.

Matrices	Dimensión
\mathcal{Q}	$m(H_p - H_w + 1) \times m(H_p - H_w + 1)$
\mathcal{R}	$lH_u \times lH_u$
Ψ	$m(H_p - H_w + 1) \times n$
Υ	$m(H_p - H_w + 1) \times l$
Θ	$m(H_p - H_w + 1) \times lH_u$
\mathcal{E}	$m(H_p - H_w + 1) \times 1$
\mathcal{G}	$lH_u \times 1$
\mathcal{H}	$lH_u \times lH_u$

Tabla 2.1: Dimensiones de las matrices y vectores.

2.2.5. Control por Modelo de Seguimiento (MFC)

El modelo de seguimiento es una descripción basada en la estructura y comportamiento del sistema, capaz de **seguir** el comportamiento de éste, conociendo las entradas y las salidas, el cual tiene la siguiente estructura (Ver Figura(2.11)):

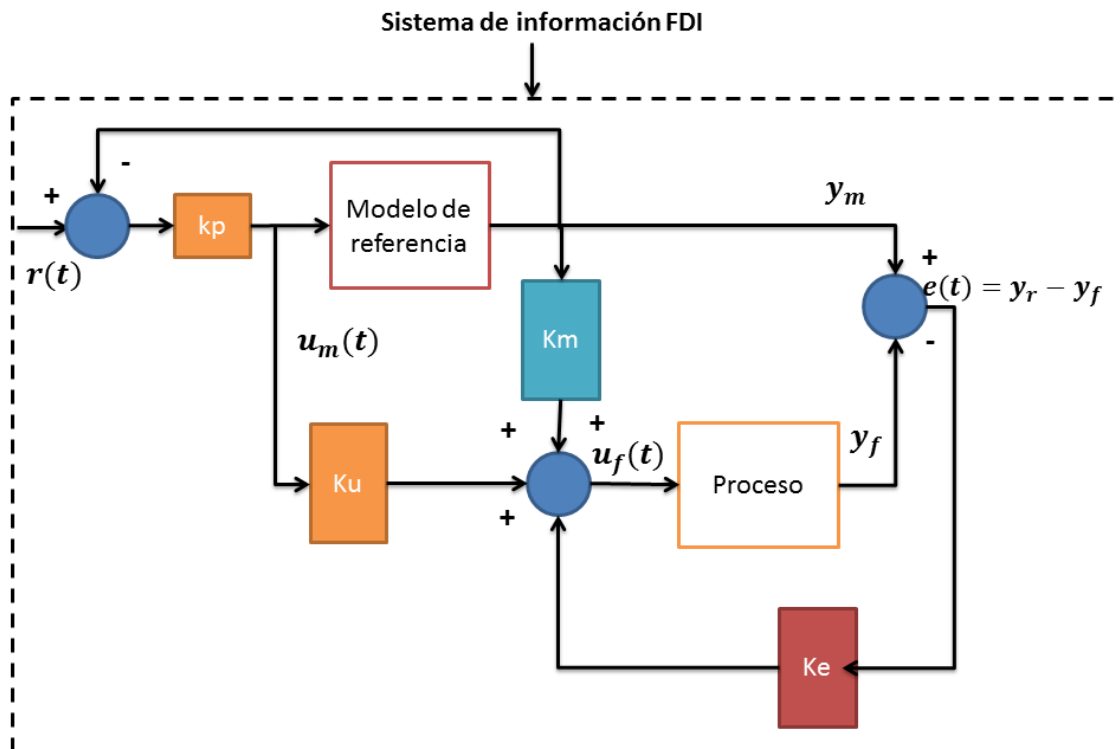


Figura 2.11: Control por Modelo de Seguimiento.

Para diseñar un control por modelo de seguimiento consideramos el modelo de

referencia que se muestra en la ecuación (2.24).

$$\begin{aligned}\dot{x}_m(t) &= A_m x_m(t) + B_m u_m(t) \\ y_m(t) &= C_m x_m(t)\end{aligned}\tag{2.24}$$

Donde $x_m \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $u_m \in \mathbb{R}^m$ es la entrada de control y $y_m \in \mathbb{R}^p$ representa la salida monitoreada del modelo de referencia. Por otra parte, $A_m \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_m \in \mathbb{R}^{n \times m}$ y $C_m \in \mathbb{R}^{q \times n}$ son las matrices que describen el comportamiento del sistema de referencia.

En este trabajo se propuso usar un modelo de referencia en lazo cerrado ya que la planta trabaja en diferentes puntos de operación.

$$\begin{aligned}\dot{x}_m(t) &= A_m x_m(t) + B_m K_p e_m(t) \\ y_m(t) &= C_m(t) x_m(t)\end{aligned}\tag{2.25}$$

Considerando el modelo nominal (sin falla) representado como se muestra en la ecuación (2.26).

$$\begin{aligned}\dot{x}_n(t) &= A_n x_n(t) + B_n u_n(t) \\ y_n(t) &= C_n x_n(t)\end{aligned}\tag{2.26}$$

Donde $x_n \in \mathbb{R}^n$, $u_n \in \mathbb{R}^m$ y $y_n \in \mathbb{R}^p$ son respectivamente: el vector de estados, la entrada de control, las salidas medidas del modelo nominal. $A_n \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_n \in \mathbb{R}^{n \times m}$ y $C_n \in \mathbb{R}^{q \times n}$ son las matrices que describen el comportamiento del sistema nominal.

La ecuación (2.27) representa el modelo nominal en lazo cerrado, donde K_n es la ganancia de control en lazo cerrado del modelo nominal. Este modelo puede usarse como modelo de referencia para la reconfiguración del sistema.

$$\begin{aligned}\dot{x}_n(t) &= A_n x_n(t) + B_n K_n y_n(t) \\ y_n(t) &= C_n x_n(t)\end{aligned}\tag{2.27}$$

En la ecuación (2.28) se presenta el modelo con falla, en nuestro caso el modelo representa la falla en el actuador.

$$\begin{aligned}\dot{x}_f(t) &= A_f x_f(t) + B_f u_f(t) \\ y_f(t) &= C_f x_f(t)\end{aligned}\tag{2.28}$$

Donde $x_f \in \mathbb{R}^n$, $u_f \in \mathbb{R}^m$ y $y_f \in \mathbb{R}^p$ son respectivamente: el vector de estados, la entrada de control y las salidas medidas del modelo cuando ocurre una falla. $A_f \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_f \in \mathbb{R}^{n \times m}$ y $C_f \in \mathbb{R}^{p \times n}$ son las matrices que describen el comportamiento del sistema cuando ocurre una falla.

Como se muestra en la Figura (2.11) el error entre la salida del modelo de referencia y la salida de la planta con falla esta dado en la ecuación (2.29). Aquí, el sistema sin falla (Modelo de referencia) y la planta con un mal funcionamiento son comparados.

$$e(t) = y_m(t) - y_f(t)\tag{2.29}$$

Aplicando el Modelo de Seguimiento Explícito (EMF) mostrado en (Cimpoeşu et al., 2011), y de acuerdo a la Figura (2.11), la entrada de control de la planta con falla puede obtenerse mediante la ecuación (2.30).

$$\begin{aligned}u_f &= u_f^{stab} + u_f^{corr}(t) \\ u_f &= (k_e e(t)) + (k_m y_m(t) + k_u u_m(t))\end{aligned}\tag{2.30}$$

donde u_f^{stab} dada en la ecuación (2.31) es la ganancia de estabilización y u_f^{corr} dada

en la ecuación (2.32) es la ganancia de corrección.

$$u_f^{stab}(t) = k_e e(t) \quad (2.31)$$

$$u_f^{corr}(t) = k_m y_m(t) + k_u u_m(t) \quad (2.32)$$

La matriz k_m y k_u están definidas en las ecuaciones (2.33 - 2.34). El procedimiento para obtener estas ecuaciones es

$$k_m = B_f^+ C_f^+ (C_m A_m C_m^+ - C_f A_f C_f^+) \quad (2.33)$$

Donde B_f^+ , C_f^+ representan la pseudo-inversa de las matrices B_f y C_f , respectivamente.

$$k_u = B_f^+ C_f^+ C_m B_m \quad (2.34)$$

Capítulo 3

Modelado del intercambiador de calor (IC)

El objetivo de este capítulo es presentar el desarrollo y la validación de dos modelos matemáticos del intercambiador de calor de tubos concéntricos y sin cambio de fase, el cual funciona como enfriador. También se presentan los experimentos que validan dichos modelos.

3.1. Modelado del intercambiador de calor (IC)

El objetivo del modelado del intercambiador de calor, es entender el fenómeno que ocurre durante su funcionamiento, para poder predecir su comportamiento, a partir de ciertas especificaciones. Es importante mencionar que un modelo matemático no es completamente exacto, es decir, funciona correctamente bajo las consideraciones tomadas para su diseño (López-Zapata, 2009).

La dinámica de los intercambiadores de calor se representa principalmente de dos posibles maneras: a través de modelos de parámetros distribuidos o concentrados (Williams y Morris, 1960). Puesto que las variaciones de los estados involucrados tienen lugar no sólo en tiempo sino también en espacio, los modelos de parámetros distribuidos son aquellos que mejor se ajustan a la naturaleza de los intercambiadores (Kano,

1982). Estos modelos se presentan por un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales. Puesto que éstas son difíciles de analizar, complejas para el diseño de controladores, sus aproximaciones a través de modelos de parámetros concentrados son generalmente preferidas (Masada y Wormley, 1983).

En este trabajo uno de los modelos es representado por ecuaciones diferenciales ordinarias y el otro modelo por ecuaciones diferenciales parciales, con el fin de comprobar cual es el modelo que presenta mejores resultados, para posteriormente utilizarlo en el diseño de controladores. Para realizar la estimación de las temperaturas en el modelo de ecuaciones diferenciales ordinarias, se consideraron dos diferentes métodos para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor en modelo termodinámico, el primero es descrito por una sola ecuación que describe de forma global la transferencia de calor entre ambas corrientes y el segundo método considera el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor para cada una de las corrientes. Por otra parte, en el modelo de ecuaciones diferenciales parciales se empleó un modelo termodinámico donde se calcula el coeficiente de transferencia de calor convectivo para cada una de las corrientes del intercambiador de calor (interna y externa).

Como se mencionó anteriormente, los modelos de parámetros concentrados son ampliamente usados para describir la dinámica de un sistema en función del tiempo, así como, para realizar el diseño de un controlador, su representación es a través de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO). Por otro lado, los modelos de parámetros distribuidos son aquellos que toman en cuenta los cambios de las variables en tiempo y en espacio y son representados por un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales (EDP).

En los trabajos presentados en (Astorga-Zaragoza et al., 2007), (Hangos et al., 2006) y (Steiner, 1989) se propone el uso del modelo matemático que representa la transferencia de calor mediante el uso de un par de ecuaciones diferenciales ordinarias, considerando el coeficiente global de transferencia de calor (U) constante, así como las propiedades físicas del agua (ρ y C_p). Sin embargo, en (Escobar et al., 2011a) y

(Escobar et al., 2009) se mostró que para que el modelo del intercambiador de calor fuera válido en un amplio rango de operación, el coeficiente de transferencia de calor tenía que ser estimado y que éste dependía del flujo del fluido y de la temperatura. Por lo tanto, si se trabaja con un modelo que considere el coeficiente global de transferencia de calor como constante, el modelo únicamente será válido en una vecindad de valores cercanos a los valores considerados para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor. En (Bagui et al., 2004) se utiliza un modelo matemático que representa la transferencia de calor mediante ecuaciones diferenciales parciales en el cual los coeficientes convectivos (h_i, h_e) se mantienen constantes, y al usar los coeficientes convectivos como constantes el modelo tienen un error mayor en la estimación de las temperaturas de salida. Para desarrollar la comparación entre los dos modelos matemáticos se consideraron los dos propuestos en la literatura (Astorga-Zaragoza et al., 2007) y (Bagui et al., 2004), el modelo empleado en (Astorga-Zaragoza et al., 2007), considera el coeficiente global de transferencia de calor constante, mientras que para el caso del modelo propuesto en (Bagui et al., 2004) se emplean los coeficientes convectivos de transferencia de calor para cada corriente, en donde los coeficientes convectivos son considerados como constantes.

En este trabajo se realizará la comparación de estos dos modelos dinámicos (Astorga-Zaragoza et al., 2007) y (Bagui et al., 2004), con una modificación en el modelo termodinámico de ambos modelos dinámicos, esta modificación consiste en estimar en línea tanto el coeficiente global de transferencia de calor para el caso del modelo presentado en (Astorga-Zaragoza et al., 2007), así como realizar la estimación en línea de los coeficientes convectivos para el caso del modelo presentado en (Bagui et al., 2004). Para el caso del modelo que emplea el coeficiente global de transferencia de calor (U) se proponen dos diferentes enfoques, el primero considera el cálculo de un sólo coeficiente global de transferencia de calor para el modelo dinámico y el segundo considera un coeficiente global para cada corriente. Para realizar este trabajo se consideran las propiedades físicas de fluido (densidad $\rho(T, P)$ y calor específico $C_p(T, P)$) dependientes de la presión y de la temperatura, y el coeficiente global de transferencia de calor y los coeficientes convectivos se consideran dependientes del flujo y de la temperatura

(Escobar et al., 2009).

3.2. Metodología

3.2.1. Planta piloto del intercambiador de calor (IC)

La Figura (3.1) muestra la planta piloto del intercambiador de calor de tubos concéntricos y flujos a contra corriente en que se basó este trabajo de tesis. En este intercambiador de calor fluye el agua caliente por el tubo interno y por el espacio anular fluye el agua fría. El objetivo del intercambiador de calor es enfriar el agua caliente. El intercambiador de calor cuenta con dos válvulas de control, la válvula de control principal (actuador 1) es el que regula el flujo de agua fría. La válvula secundaria (actuador 2) es empleado para operar el equipo en caso de falla en el actuador principal.

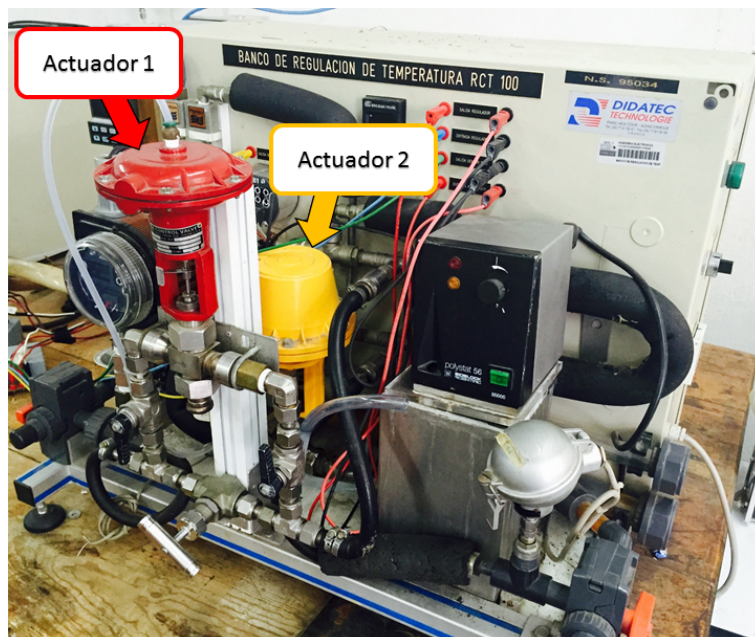


Figura 3.1: Intercambiador de calor.

En el intercambiador de calor hay cuatro sensores de temperatura (Ver Anexo A) y dos flujómetros analógicos, por lo tanto no es posible realizar mediciones del flujo en línea. Posteriormente se explica el método usado para estimar los flujos volumétricos de ambas corrientes y como es posible enviar una señal al actuador (válvula de control).

El sistema de adquisición de datos del intercambiador de calor está compuesto por una tarjeta de adquisición National Instruments Modelo USB-6008 y un convertidor de señal (Ver Figura (3.2)).

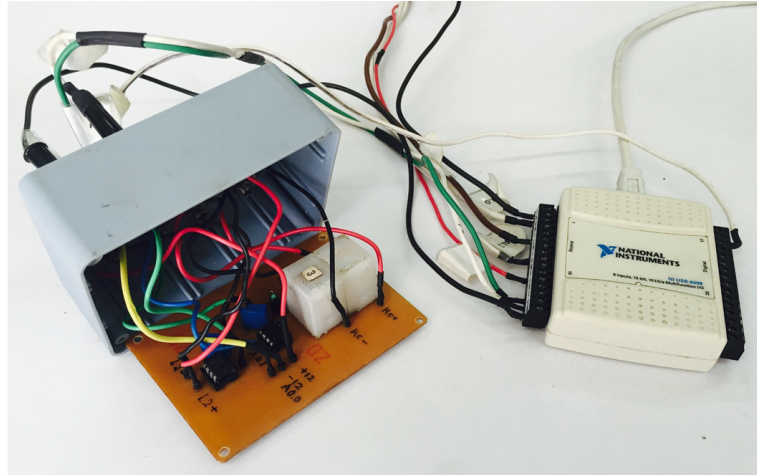


Figura 3.2: Tarjeta de adquisición de datos y convertidor de señal.

La Figura (3.3) presenta el esquema del intercambiador de calor de tubos concéntricos y flujos a contracorriente y sin cambio de fase bajo estudio.

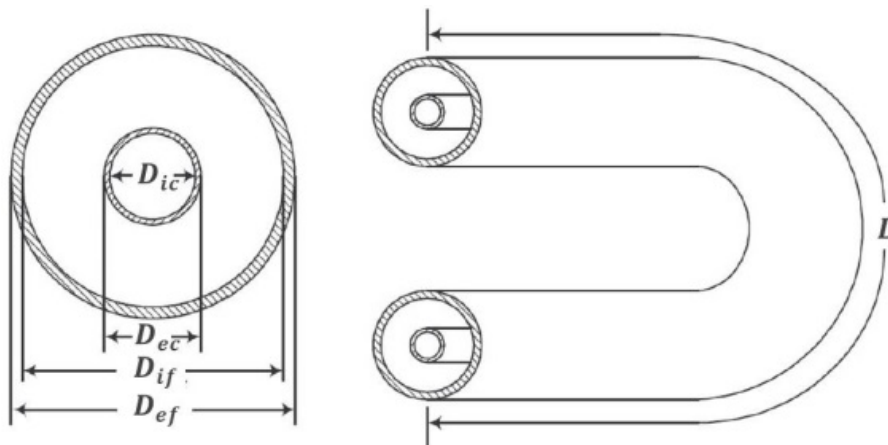


Figura 3.3: Diagrama de los tubos del intercambiador de calor.

La Tabla (3.1) muestra las mediciones físicas de los tubos del intercambiador de calor. Para efectos de cálculo del volumen y área de transferencia de calor del intercambiador.

Constantes	Valor	Unidades
L	790	mm
D_{ic}	6	mm
D_{ec}	10	mm
D_{if}	16	mm
D_{ef}	20	mm

Tabla 3.1: Dimensiones del intercambiador de calor.

3.3. Modelo dinámico de parámetros concentrados

Considere el intercambiador de calor tipo doble tubo (o de tubos concéntricos) con flujos a contracorriente, tal como se mostró en la Figura (2.1). El flujo en el tubo interno es el fluido caliente y el flujo en la región anular que rodea al tubo interno es el fluido frío.

Debido a que la temperatura del líquido no sólo cambia con el tiempo t sino también a lo largo de la dirección axial x del valor T_{fent} y T_{cent} en la entrada al valor T_{fsal} y T_{csal} en la salida respectivamente, el modelo de parámetros concentrados se basa en la división del intercambiador de calor en un número finito de elementos, llamados secciones o celdas, donde cada celda representa un par de ecuaciones diferenciales ordinarias. Este procedimiento de seccionamiento asume que cada elemento se comporta como un tanque perfectamente agitado, y en consecuencia la temperatura del fluido se considera uniforme (Weyer et al., 2000). La Figura (3.4) muestra la representación del intercambiador de calor de una celda en configuración contracorriente.

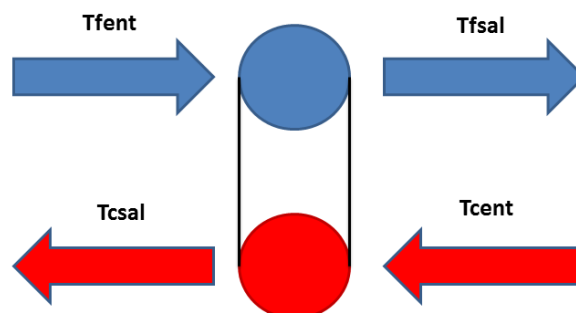


Figura 3.4: Representación del intercambiador de calor de una celda.

El modelo matemático que aquí se presenta, toma en cuenta las siguientes suposiciones.

- Volumen constante en ambos tubos.
- El coeficiente global de transferencia de calor está relacionado con las temperaturas de los fluidos y con el flujo y no es considerado constante.
- No existe transferencia de calor entre el tubo externo y el medio ambiente.
- No hay almacenamiento de energía calorífica en las paredes de los tubos.
- Las temperaturas de entrada son medibles.

De acuerdo a las suposiciones definidas anteriormente, la dinámica del sistema se puede obtener mediante un balance de energía aplicado a cada una de las celdas y se define de la siguiente manera (Luyben, 1989):

$$\begin{aligned}
 \left[\begin{array}{l} \text{Rapidez de cambio} \\ \text{de la energía interna} \\ \text{cinética y potencial} \\ \text{dentro del sistema} \end{array} \right] &= \left[\begin{array}{l} \text{Flujo de energía interna} \\ \text{cinética o potencial que} \\ \text{entra al sistema por} \\ \text{convección o difusión} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Flujo de energía interna} \\ \text{cinética o potencial que} \\ \text{sale del sistema por} \\ \text{convección o difusión} \end{array} \right] \dots \\
 \dots + \left[\begin{array}{l} \text{Calor adicionado} \\ \text{al sistema} \\ \text{por conducción} \\ \text{radiación o reacción} \end{array} \right] &- \left[\begin{array}{l} \text{Trabajo hecho por el sistema} \\ \text{sobre los alrededores:} \\ \text{trabajo de flecha más} \\ \text{trabajo de flujo} \end{array} \right] \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

Dado que el procedimiento de agrupar en general, supone que cada elemento se comporta como un tanque perfectamente agitado (Varga et al., 1995), aplicamos la ecuación (3.1) al elemento externo del intercambiador de calor de una celda en contracorriente y se obtiene (Hangos et al., 2006):

$$\rho_f c_{pf} V_f \frac{dT_{f_{sal}}}{dt} = \rho_f c_{pf} F_{f_{ent}} (T_{f_{ent}} - T_{f_{sal}}) + U A \Delta T \quad (3.2)$$

El lado izquierdo de esta ecuación representa la rapidez de variación de energía calorífica acumulada en la celda. En el lado derecho se tienen los flujos de energía transportada por los fluidos (transferencia de calor por convección) sumados con el flujo de energía calorífica que se transfiere del tubo caliente al tubo frío (transferencia de calor por conducción).

Despejando $\frac{dT_{f\text{sal}}}{dt}$ se tiene:

$$\frac{dT_{f\text{sal}}}{dt} = \frac{F_{f\text{ent}}}{V_f} (T_{f\text{ent}} - T_{f\text{sal}}) + \frac{UA}{\rho_f C_{pf} V_f} \Delta T_{I1} \quad (3.3)$$

De igual forma se procede con el elemento interno de la celda (Ver Figura (3.4)). Aplicando el balance de energía y despejando $\frac{dT_{c\text{sal}}}{dt}$ se obtiene:

$$\frac{dT_{c\text{sal}}}{dt} = \frac{F_{c\text{ent}}}{V_c} (T_{c\text{ent}} - T_{c\text{sal}}) + \frac{UA}{\rho_c C_{pc} V_c} \Delta T_{I2} \quad (3.4)$$

Donde f denota al agua fría y c el agua caliente. Además, los subíndices ent y sal indican entradas y salidas respectivamente. Además, La diferencia de temperatura entre los fluidos ΔT_{I1} y ΔT_{I2} en las ecuaciones (3.3) y (3.4), es la fuerza conductora que da lugar a la transferencia de calor por convección. La fuerza conductora se expresa en términos de la *diferencia de temperaturas a la entrada* (ITD), que se definen como:

$$\Delta T_{I1} = (T_{c\text{sal}} - T_{f\text{sal}}) \quad (3.5)$$

$$\Delta T_{I2} = (T_{f\text{sal}} - T_{c\text{sal}}) \quad (3.6)$$

Así que finalmente la dinámica del intercambiador de calor obtenida por el balance de energía para cada uno de los lados del intercambiador de calor está dada en la ecuación (3.7):

$$\begin{aligned} \frac{dT_{f\text{sal}}}{dt} &= \frac{F_{f\text{ent}}}{V_f} (T_{f\text{ent}} - T_{f\text{sal}}(t)) + \frac{UA}{\rho_f C_{pf} V_f} (T_{c\text{sal}}(t) - T_{f\text{sal}}(t)) \\ \frac{dT_{c\text{sal}}}{dt} &= \frac{F_{c\text{ent}}}{V_c} (T_{c\text{ent}} - T_{c\text{sal}}(t)) + \frac{UA}{\rho_c C_{pc} V_c} (T_{f\text{sal}}(t) - T_{c\text{sal}}(t)) \end{aligned} \quad (3.7)$$

3.3.1. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (U)

Para estimar las temperaturas en el intercambiador de calor con precisión, en este trabajo se propone calcular el coeficiente global de transferencia de calor (U) en línea (con datos experimentales en cada tiempo), a través de los coeficientes convectivos (h_i, h_e), de aquí en adelante, el subíndice φ se utiliza para referirse al lado externo o interno.

El coeficiente convectivo (h_φ) puede ser calculado para cada lado del intercambiador de calor usando la ecuación (3.8):

$$h_\varphi = \frac{Nu_\varphi}{\frac{D}{\lambda_\varphi}} \quad (3.8)$$

Para una sola fase, el coeficiente convectivo se determina utilizando el número de Nusselt (Nu), que se calcula para cada lado del intercambiador de calor usando las siguientes formulas (correlación Dittus & Boelter):

Para flujos laminares:

$$Nu_\varphi = 0,664 Re_\varphi^{0,5} Pr_\varphi^{0,3} \quad (3.9)$$

Para flujos turbulentos:

$$Nu_\varphi = 0,02 Re_\varphi^{0,8} Pr_\varphi^{0,4} \quad (3.10)$$

El número de Prandtl Pr se calcula con la ecuación (3.11) y el número de Reynolds Re se calcula con la ecuación (3.12).

$$Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda} \quad (3.11)$$

$$Re = \frac{\rho D V e l}{\mu} \quad (3.12)$$

El coeficiente global de transferencia de calor (U) se puede calcular mediante dos métodos, el primer método es descrito en (3.13), el cual es representado por una sola

ecuación que describe de forma global la transferencia de calor que existe entre ambos fluidos (Holman, 1999), y el segundo método es el descrito en (3.14) donde el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor se considera para cada uno de los fluidos (Holman, 1999). En este trabajo se realiza la estimación de las temperaturas empleando ambos métodos.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{r_e \ln(\frac{r_e}{r_i})}{\lambda} + \frac{1}{h_i}} \quad (3.13)$$

$$U_e = \frac{1}{\frac{A_e}{A_i h_i} + \frac{A_e}{\lambda 2\pi L} \ln \frac{A_e}{A_i} + \frac{1}{h_e}} \quad U_i = \frac{1}{\frac{A_i}{A_e h_e} + \frac{A_i}{\lambda 2\pi L} \ln \frac{A_i}{A_e} + \frac{1}{h_i}} \quad (3.14)$$

3.4. Modelo dinámico de parámetros distribuidos

Otro modelo propuesto es el presentado en (Bagui et al., 2004) en el cual se asumen las siguientes suposiciones:

- Se determina el tipo de flujo dependiendo el número de Reynolds.
- Las propiedades térmicas de las paredes de las tuberías y los fluidos están relacionados con la temperatura de los fluidos y el flujo y no se consideran constantes.
- Con el fin de obtener un modelo del intercambiador de calor se considera un volumen elemental diferencial.
- Las temperaturas de entrada son medibles.
- No existe transferencia de calor entre el tubo externo y el medio ambiente.

Basado en los supuestos anteriores, la transferencia de calor de transición entre los dos fluidos y la pared de separación se rige por un modelo puramente advectivo como se indica a continuación:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial T_c(x, t)}{\partial t} - V_c \frac{\partial T_c(x, t)}{\partial x} &= H_c(T_p(x, t) - T_c(x, t)) \\
\frac{\partial T_f(x, t)}{\partial t} - V_f \frac{\partial T_f(x, t)}{\partial x} &= H_f(T_p(x, t) - T_f(x, t)) \\
\frac{\partial T_p(x, t)}{\partial t} &= H_{cp}(T_h(x, t) - T_p(x, t)) + H_{fp}(T_c(x, t) - T_p(x, t))
\end{aligned} \tag{3.15}$$

H_c , H_f , H_{cp} y H_{fp} son parámetros de acoplamiento, que están en función de los coeficientes de transferencia de calor por convección y se calculan como se muestra en las ecuaciones mostradas en (3.16)

$$\begin{aligned}
H_{cp} &= \frac{2h_i r_i}{\rho_p C_{p_p} ((r_i + E_p)^2 - r_i^2)} \\
H_{fp} &= \frac{2h_e (r_i + E_i)}{\rho_p C_{p_p} ((r_i + e_i)^2 - r_i^2)} \\
H_c &= \frac{2h_i}{\rho_c C_{p_c} r_i} \\
H_f &= \frac{2h_e (r_i + E_i)}{\rho_f C_{p_f} (r_e^2 - (r_i + E_i)^2)}
\end{aligned} \tag{3.16}$$

3.4.1. Cálculo de los coeficientes convectivos (h_i , h_e) de transferencia de calor

Como se mencionó anteriormente para estimar las temperaturas de salida con una mejor precisión, se calculan en línea los coeficientes convectivos (h_i , h_e).

En la práctica, la mayoría de las predicciones del coeficiente de transferencia de calor por convección h_i , h_e se basan en correlaciones que han sido derivadas de experimentos llevados a cabo en un intercambiador de calor específico.

Para una sola fase, el coeficiente convectivo se determina utilizando el número de Nusselt (Nu), en este caso para calcular el número de Nusselt utilizamos las siguientes fórmulas:

Para flujos laminares:

$$Nu_{\varphi} = 0,5Re_{\varphi}^{0,67}Pr_{\varphi}^{0,3} \quad (3.17)$$

Para flujos turbulentos:

$$Nu_{\varphi} = 0,023Re_{\varphi}^{0,577}Pr_{\varphi}^{0,4} \quad (3.18)$$

El número de Prandtl Pr se calcula con la ecuación (3.19) y el número de Reynolds Re se calcula con la ecuación (3.20).

$$Pr = \frac{C_p\mu}{\lambda} \quad (3.19)$$

$$Re = \frac{\rho D V el}{\mu} \quad (3.20)$$

El coeficiente convectivo (h_{φ}) puede ser calculado para cada lado del intercambiador de calor usando la ecuación mostrada en (3.21):

$$h_{\varphi} = \frac{Nu_{\varphi}}{\frac{D}{\lambda_{\varphi}}} \quad (3.21)$$

3.5. Resultados

Para desarrollar la comparación del modelo de parámetros concentrados y el de parámetros distribuidos bajo las mismas condiciones de operación se emplearon datos experimentales tomados de una planta piloto de un intercambiador de calor los cuales han sido reportados en (García-Morales, 2013) y (López-Zapata, 2009).

Las condiciones de operación del intercambiador de calor son las siguientes: el flujo de agua caliente se mantiene constante en $1,667 \times 10^{-6} m^3/s$ y el flujo de agua fría se varía en un intervalo de $6,667 \times 10^{-6} m^3/s$ y $8,922 \times 10^{-7} m^3/s$ como se muestra en la Figura (3.5). La temperatura inicial del agua fría se varía en un intervalo entre $26^{\circ}C$ y $29^{\circ}C$ como se muestra en la Figura (3.6(a)), mientras que la temperatura inicial del agua caliente se varía en un intervalo entre $49^{\circ}C$ y $83^{\circ}C$ como se muestra en la Figura

(3.6(b)).

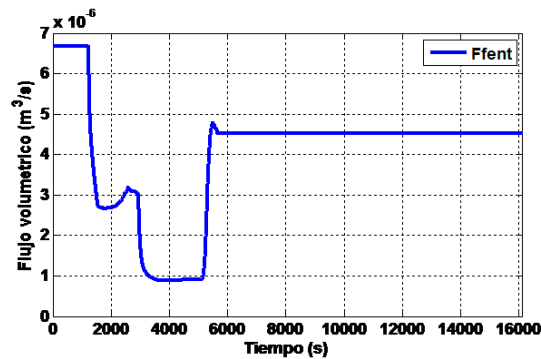
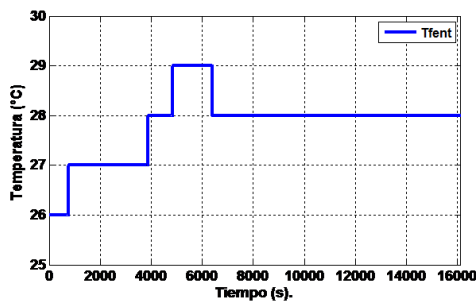
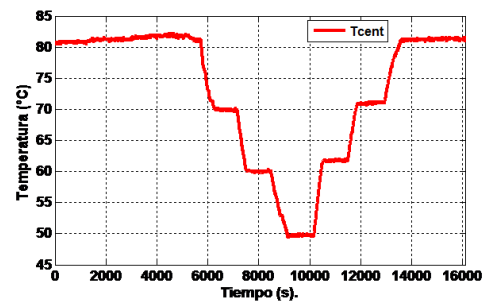


Figura 3.5: Flujo de entrada del agua fría.



(a) Temperatura de entrada del agua fría



(b) Temperatura de entrada del agua caliente

Figura 3.6: Temperaturas de entrada del agua fría y caliente.

3.5.1. Validación del modelo de parámetros concentrados

A continuación se muestran los resultados del modelo de parámetros concentrados empleando el modelo termodinámico que usa la ecuación (3.13).

Entre el segundo 1 y 3000 se operó el intercambiador de calor con un flujo de agua fría que se varió entre $6,667 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ y $1,03 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ como se muestra en la Figura (3.5), la temperatura de agua fría se trabajó entre 26°C y 27°C y la temperatura de agua caliente se trabajó en un intervalo entre 80°C y 83°C como se aprecia en las Figuras (3.6(a), 3.6(b)), el modelo estima ambas temperaturas de salida con un error pequeño, el error relativo de la temperatura de agua fría fue de 0,0090, mientras que

el error de la temperatura de agua caliente fue de 0,0070.

Entre el segundo 3001 y 5000 el intercambiador de calor se operó en una condición extrema que consiste en trabajar con el flujo mínimo de agua fría que nos permite la planta igual a $8,83 \times 10^{-7} m^3/s$ como se muestra en la Figura (3.5), la temperatura de agua fría se varió entre $27^\circ C$ y $28^\circ C$ y la temperatura de agua caliente se trabajó en $83^\circ C$ como se muestra en las Figuras (3.6(a), 3.6(b)), el modelo estima la temperatura de salida del agua fría con un error mayor que con las condiciones de operación anteriores, esto se debe probablemente a un error de medición del sensor de temperatura del agua fría ya que al trabajar con flujos muy pequeños el sensor no adquiere correctamente la señal, al estimar la temperatura de agua fría se obtiene un error relativo de 0,0113 y al estimar la temperatura de agua caliente se obtiene un error relativo de 0,0090.

A partir del segundo 5001 el intercambiador de calor se operó bajo las siguientes condiciones: el flujo de agua fría igual a $4,51 \times 10^{-6} m^3/s$ como se muestra en la Figura (3.5), la temperatura de agua fría se varió entre $28^\circ C$ y $29^\circ C$ y la temperatura de agua caliente se trabajó en un intervalo entre $49^\circ C$ y $83^\circ C$ como se muestra en las Figuras (3.6(a), 3.6(b)), se obtiene una buena estimación de ambas temperaturas de salida, la estimación de la temperatura de salida del agua fría tiene un error relativo igual a 0,0085 y la estimación de la temperatura de salida del agua caliente tiene un error relativo igual a 0,0067.

La Figura (3.7) presenta los resultados de la comparación entre las temperaturas estimadas con el modelo de parámetros concentrados con el modelo termodinámico que emplea la ecuación (3.13) versus datos experimentales.

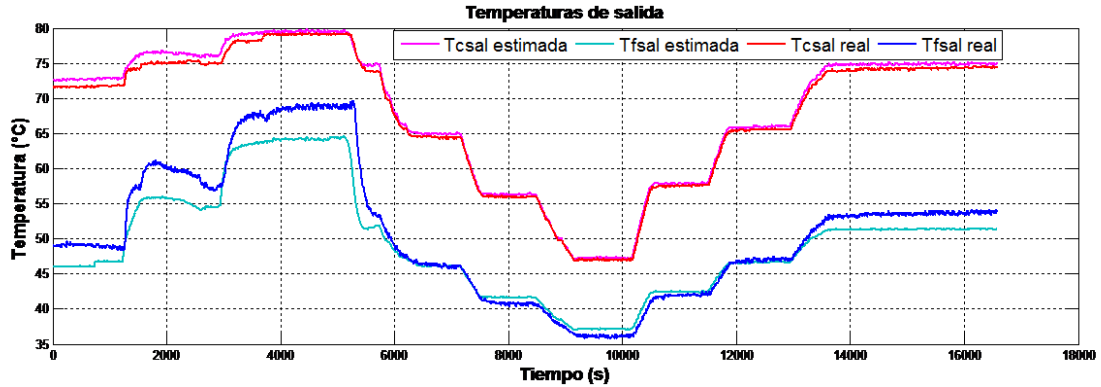


Figura 3.7: Comparación entre las temperaturas de salida estimadas por el modelo de parámetros concentrados y los datos obtenidos experimentalmente (El coeficiente global de transferencia de calor U es calculado con la ecuación (3.13)).

Ahora se muestran los resultados del modelo de parámetros concentrados empleando el modelo termodinámico que usa la ecuación (3.14).

Entre el segundo 1 y 3000 se operó el intercambiador de calor con un flujo de agua fría que se varió entre $6,667 \times 10^{-6} m^3/s$ y $1,03 \times 10^{-6} m^3/s$ como se muestra en la Figura (3.5), la temperatura de agua fría se trabajó entre $26^\circ C$ y $27^\circ C$ y la temperatura de agua caliente se trabajó en un intervalo entre $80^\circ C$ y $83^\circ C$ como se muestra en las Figuras (3.6(a), 3.6(b)), el modelo estima la temperatura de agua fría con un error relativo de 0,0040, mientras que al estimar la temperatura de agua caliente se obtiene un error relativo de 0,0032.

Entre el segundo 3001 y 5000 el intercambiador de calor nuevamente se operó en una condición extrema que consiste en trabajar con el flujo mínimo de agua fría igual a $8,83 \times 10^{-7} m^3/s$ como se muestra en la Figura (3.5), la temperatura de agua fría se varió entre $27^\circ C$ y $28^\circ C$ y la temperatura de agua caliente se trabajó en $83^\circ C$ como se ilustra en las Figuras (3.6(a), 3.6(b)), el modelo estima la temperatura de salida del agua fría con un error mayor que con las condiciones de operación anteriores, esto se debe probablemente a un error de medición del sensor de temperatura del agua fría ya que al trabajar con flujos muy pequeños el sensor no adquiere correctamente la señal, al estimar la temperatura de agua fría se obtiene un error relativo de 0,0085 y al estimar la temperatura de agua caliente se obtiene un error relativo de 0,0048.

A partir del segundo 5001 el intercambiador de calor se operó bajo las siguientes condiciones: el flujo de agua fría igual a $4,51 \times 10^{-6} m^3/s$ como se muestra en la Figura (3.5), la temperatura de agua fría se varió entre $28^\circ C$ y $29^\circ C$ y la temperatura de agua caliente se trabajó en un intervalo entre $49^\circ C$ y $83^\circ C$ como se ilustra en las Figuras (3.6(a), 3.6(b)), se obtiene una buena estimación de ambas temperaturas de salida, la estimación de la temperatura de salida del agua fría tiene un error relativo igual a 0,0033 y la estimación de la temperatura de salida del agua caliente tiene un error relativo igual a 0,0028.

La Figura (3.8) presenta los resultados de la comparación entre las temperaturas estimadas con el modelo de parámetros concentrados con el modelo termodinámico que emplea la ecuación (3.14) versus datos experimentales.

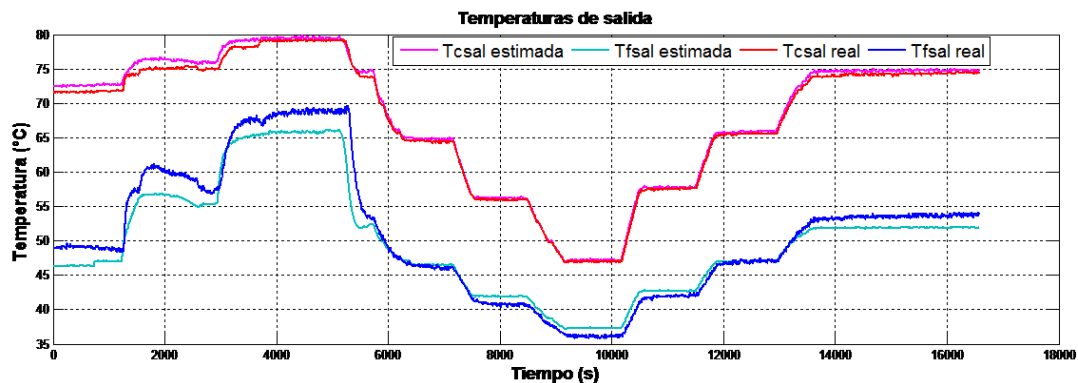


Figura 3.8: Comparación entre las temperaturas de salida estimadas por el modelo de parámetros concentrados y los datos obtenidos experimentalmente (El coeficiente global de transferencia de calor U es calculado con la ecuación (3.14)).

3.5.2. Validación del modelo de parámetros distribuidos

A continuación se muestran los resultados del modelo de parámetros distribuidos empleando el modelo termodinámico que usa la ecuación (3.21).

Entre el segundo 1 y 3000 se operó el intercambiador de calor con un flujo de agua fría que se varió entre $6,667 \times 10^{-6} m^3/s$ y $1,03 \times 10^{-6} m^3/s$ como se muestra en la Figura (3.5), la temperatura de agua fría se trabajó entre $26^\circ C$ y $27^\circ C$ y la temperatura de agua caliente se trabajó en un intervalo entre $80^\circ C$ y $83^\circ C$ como se ilustra en las Figuras (3.6(a), 3.6(b)), el modelo estima ambas temperaturas de salida con un error pequeño, ya que al estimar la temperatura de agua fría se obtiene un error relativo de 0,0125, mientras que al estimar la temperatura de agua caliente se obtiene un error relativo de 0,0102.

Entre el segundo 3001 y 5000 el intercambiador de calor se operó en condición extrema que consiste en trabajar con el flujo mínimo de agua fría que nos brinda la planta igual a $8,83 \times 10^{-7} m^3/s$ como se muestra en la Figura (3.5), la temperatura de agua fría se varió entre $27^\circ C$ y $28^\circ C$ y la temperatura de agua caliente se trabajó en $83^\circ C$ como se ilustra en las Figuras (3.6(a), 3.6(b)), el modelo estima la temperatura de salida del agua fría con un error mayor esto se debe probablemente al error de medición del sensor de temperatura del agua fría ya que al trabajar con este flujo de agua el sensor por su mala ubicación no adquiere la señal correcta, al estimar la temperatura de agua fría se obtiene un error relativo de 0,0213, mientras que al estimar la temperatura de agua caliente se obtiene un error relativo de 0,0187.

A partir del segundo 5001 el intercambiador de calor se operó bajo las siguientes condiciones: el flujo de agua fría igual a $4,51 \times 10^{-6} m^3/s$ como se muestra en la Figura (3.5), la temperatura de agua fría se varió entre $28^\circ C$ y $29^\circ C$ y la temperatura de agua caliente se trabajó en un intervalo entre $49^\circ C$ y $83^\circ C$ como se ilustra en las Figuras (3.6(a), 3.6(b)), se obtiene una buena estimación de ambas temperaturas de salida, la estimación de la temperatura de salida del agua fría tiene un error relativo igual a 0,0101 y la estimación de la temperatura de salida del agua caliente tiene un error

relativo igual a 0,0089.

La Figura (3.9) muestra los resultados obtenidos al estimar las temperaturas de salida del intercambiador de calor en el modelo de parámetros distribuidos utilizando la formula (3.21) para calcular los coeficientes convectivos (h_i, h_e) para cada uno de los fluidos (caliente y frío).

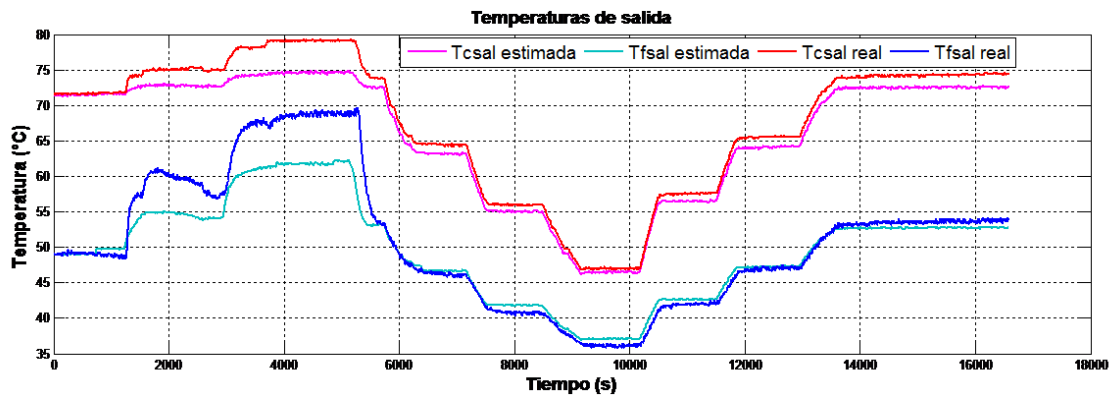


Figura 3.9: Comparación entre las temperaturas de salida estimadas por el modelo de parámetros distribuidos y los datos obtenidos experimentalmente.

3.6. Conclusión del modelado del intercambiador de calor

De acuerdo a los resultados obtenidos con la comparación de los modelos y de los datos experimentales, el modelo de parámetros concentrados utilizando el coeficiente global de transferencia de calor para cada uno de los fluidos es el que mostró mejor desempeño en la estimación de las temperaturas con errores relativos de 0,0052 para el flujo de agua fría y de 0,0036 para el flujo de agua caliente. En el caso de la estimación de las temperaturas con el modelo de parámetros concentrados calculando el coeficiente global de transferencia de calor que describe la transferencia de calor que existe entre ambos fluidos también demostró un desempeño aceptable con errores relativos de 0,0096 para el flujo de agua fría y de 0,0075 para el flujo de agua caliente. Por último la estimación de las temperaturas de salida con el modelo de parámetros distribuidos

3.6. CONCLUSIÓN DEL MODELADO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR 71

fue el que tuvo el error más grande de estimación con errores relativos de 0,0146 para el flujo de agua fría y de 0,0126 para el flujo de agua caliente.

Por lo que se concluye que el modelo a utilizar para el desarrollo del sistema de control tolerante a fallas será el modelo de parámetros concentrados debido a que éste tiene un error menor en la estimación de las temperaturas de salida del intercambiador de calor.

Capítulo 4

CTF aplicado en un intercambiador de calor

Este capítulo presenta el diseño de un sistema de control tolerante a fallas aplicado a un intercambiador de calor de tubos concéntricos y flujos a contra corriente, para explicar el desarrollo del CTF mediante dos técnicas de control diferentes (MPC y MFC) la sección 4.1 presenta el diseño de un observador adaptativo para estimar los flujos de entrada al intercambiador de calor, la sección 4.2 muestra el desarrollo matemático del control predictivo y la sección 4.3 describe el desarrollo matemático del control por modelo de seguimiento para utilizarlos posteriormente en el sistema de control tolerante a fallas.

Para el desarrollo del sistema de control tolerante a fallas que se propone en este trabajo de tesis fue necesario desarrollar un sistema de diagnóstico de fallas. Con la finalidad de diagnosticar la falla por atascamiento en el actuador principal se implementó un sistema FDI. (Ver Figura (4.1)).

El sistema FDI propuesto en este trabajo de tesis está compuesto por un observador adaptativo (OA) y un controlador, donde el controlador tiene dos propósitos: controlar la temperatura del intercambiador de calor y proporcionar a el sistema FDI el valor de la variable de entrada (u). La detección de la falla se realiza a través de un algoritmo lógico que evalúa el error de estimación contra un umbral propuesto en el

diseño. El error de estimación es determinado por la diferencia entre el caudal del flujo estimado por el observador adaptativo (\hat{u}) y el caudal del flujo proporcionado por la ley de control (u).

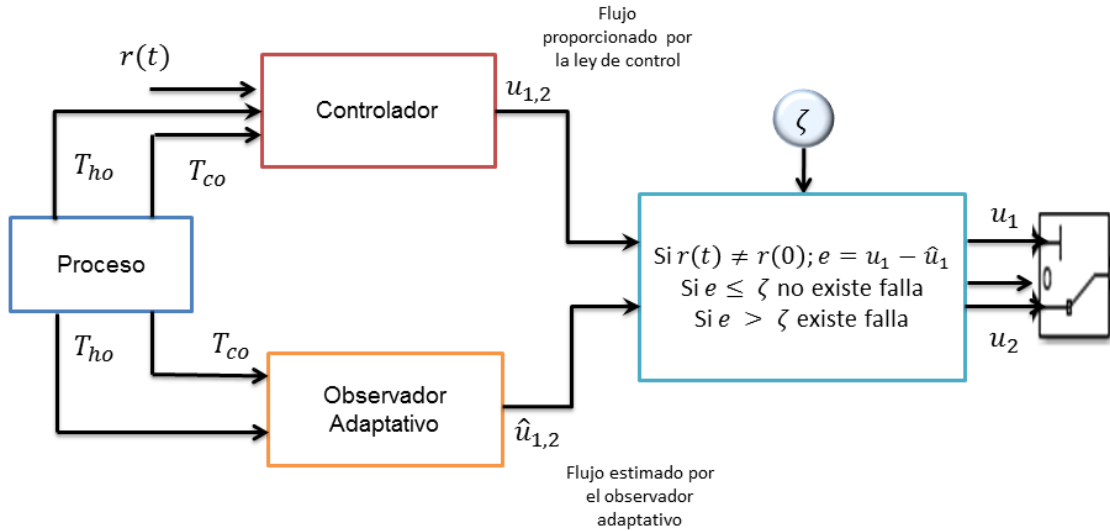


Figura 4.1: Sistema FDI.

4.1. Observador adaptativo

Para poder implementar el sistema de diagnóstico y aislamiento de fallas fue necesario emplear un observador adaptativo debido a que no se cuenta en la planta con flujómetros digitales. El observador adaptativo estima los flujos volumétricos de entrada a partir de las dos temperaturas de salida medidas.

El observador adaptativo usado en este trabajo fue propuesto en (Besançon, 2000), en este trabajo el autor diseña un observador adaptativo para estimar entradas desconocidas, considerando sistemas no lineales de la forma dada en (4.1).

$$\begin{aligned}\hat{x} &= f(x, u, t) + g(x, u, t)\theta \\ y &= h(x)\end{aligned}\tag{4.1}$$

donde f y g son funciones no lineales y las variables x, u, y, θ son: los estados en \mathbb{R}^n , la entrada de control en \mathbb{R}^m , las salidas medidas en \mathbb{R}^p y el vector de entradas desconocidas en \mathbb{R}^q respectivamente. El observador adaptativo no lineal diseñado por (Besançon, 2000) esta dado en la ecuación (4.2).

$$\begin{aligned}\dot{\hat{y}} &= \alpha(y(t), \hat{z}(t), u(t)) + \beta(y(t), u(t), \hat{\theta}(t)) - k_y(\hat{y}(t) - y(t))^T \\ \dot{\hat{z}} &= \lambda(y(t), \hat{z}(t), u(t)) \\ \dot{\hat{\theta}} &= -k_\theta \beta^T(y(t), \hat{z}(t), u(t))(\hat{y}(t) - y(t))^T\end{aligned}\tag{4.2}$$

Para el propósito de este trabajo se considera una forma reducida del observador adaptativo mostrado en la ecuación (4.2). Como se mencionó previamente, para diseñar el sistema FDI es necesario estimar los flujos volumétricos en el intercambiador de calor, en nuestro caso no hay estados desconocidos que estimar, por lo tanto el observador adaptativo reducido queda de la forma dada en la ecuación (4.3).

$$\begin{aligned}\dot{\hat{y}} &= \alpha(y(t), u(t)) + \beta(y(t), u(t), \hat{\theta}(t)) - k_y(\hat{y}(t) - y(t))^T \\ \dot{\hat{\theta}} &= -k_\theta \beta^T(y(t), u(t))(\hat{y}(t) - y(t))^T\end{aligned}\tag{4.3}$$

De la ecuación (4.3) diseñamos el observador adaptativo que estima los flujos de entrada al intercambiador de calor usando las temperaturas medidas como entrada.

$$\begin{aligned}\dot{\hat{y}}_1 &= \frac{U_e A_e}{\rho_f C p_f V_f} (y_2 - y_1) + \frac{1}{V_f} (T_{fent} - y_1) \hat{F}_{fent} - K_y (\hat{y}_1(t) - y_1(t)) \\ \dot{\hat{y}}_2 &= \frac{U_i A_i}{\rho_c C p_f V_c} (y_2 - y_1) + \frac{1}{V_c} (T_{cent} - y_2) \hat{F}_{cent} - K_y (\hat{y}_2(t) - y_2(t)) \\ \dot{\hat{F}}_{fent} &= -k_\theta \left(\frac{1}{V_f} (T_{fent} - y_1) (\hat{y}_1(t) - y_1(t)) \right) \\ \dot{\hat{F}}_{cent} &= -k_\theta \left(\frac{1}{V_c} (T_{fcent} - y_2) (\hat{y}_2(t) - y_2(t)) \right)\end{aligned}\tag{4.4}$$

En la ecuación (4.4) se presenta el observador adaptativo para estimar los flujos

(F_{fent} y F_{cent}) para ambas corrientes (fría y caliente) del intercambiador de calor.

4.2. Control Predictivo Basado en Modelo (MPC)

Para desarrollar e implementar el sistema de CTF basado en control predictivo (Figura (4.2)) para el intercambiador de calor de tubos concéntricos, se implementó un sistema FDI y un controlador predictivo. El sistema FDI es empleado para detectar y aislar la falla en el actuador, una vez que esta tarea ha sido realizada y la falla ha sido localizada se reconfigura la ley de control y el sistema FDI envía la información de la falla ocurrida al bloque de control predictivo para realizar la acomodación con el fin de lograr el objetivo de control principal usando el actuador 2 (válvula de control de agua caliente) en lugar del actuador 1 (válvula de control de agua fría).

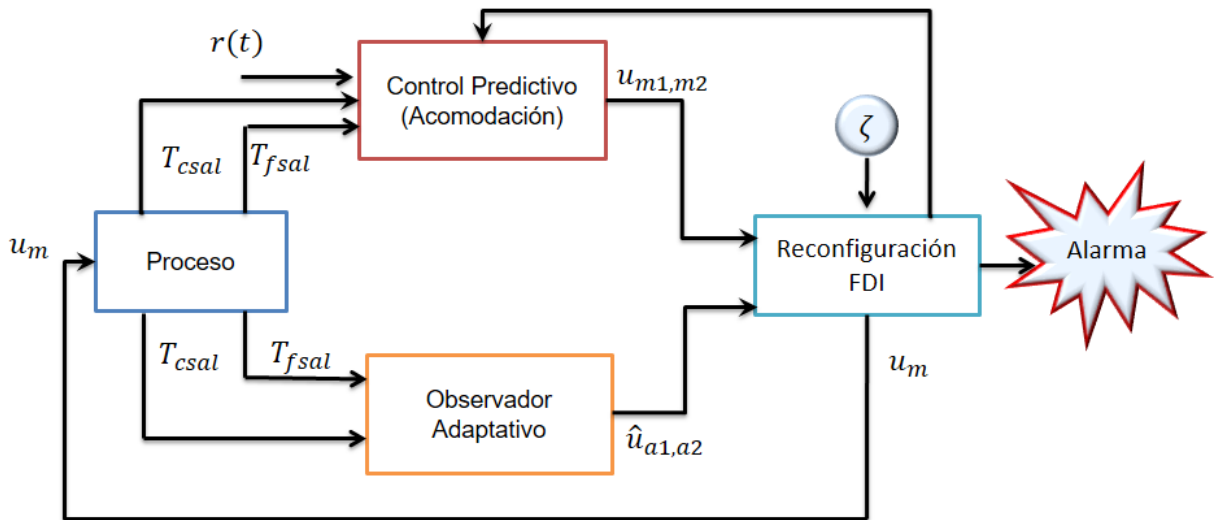


Figura 4.2: CTF basado en Control Predictivo.

4.2.1. Desarrollo matemático del control predictivo

El control predictivo ofrece los recursos para diseñar un control tolerante a fallas. El atasco de un actuador de la planta se representa fácilmente cambiando las restricciones de la ley de control en el actuador fallado ($\Delta u_j = 0$). Este tipo de fallas se visualizan

fisicamente cuando al actuador se le pide que abra o cierra, según las necesidades del control y dicho actuador se fija en un valor.

El CTF basado en control predictivo usa todas las señales de entrada disponibles u_i y las señales de salida y_i . Si en el nivel de supervisión se detecta una falla, las restricciones de desigualdades incluidas en el problema de optimización pueden cambiarse de modo que el control predictivo se adapta a las fallas del sistema. Esto se puede realizar de una manera eficiente para fallas en actuadores (Blanke et al., 2001) y (Maciejowski, 2000). Entonces el control predictivo mueve la actividad de control hacia los actuadores disponibles, lo cual puede ser interpretado como una reconfiguración en línea del lazo de control (Majanne y Lautala, 2003).

Lo mencionado en el párrafo anterior provocará que la señal de control del actuador fallado permanezca constante desde el momento en que la falla se presenta, sin embargo las otras señales de control (considerando un proceso multivariable) modificarán toda su actividad de control para compensar la falla.

En este entorno, se diseñó un sistema de CTF en actuadores para detectar fallas en el actuador principal del intercambiador de calor, si el nivel de diagnóstico detecta una falla en la válvula de control principal entonces este actuador se reemplaza por un actuador secundario y la ley de control se adapta al control de temperatura del proceso en modo degradado (lo cual puede ser interpretado como una acomodación de la falla).

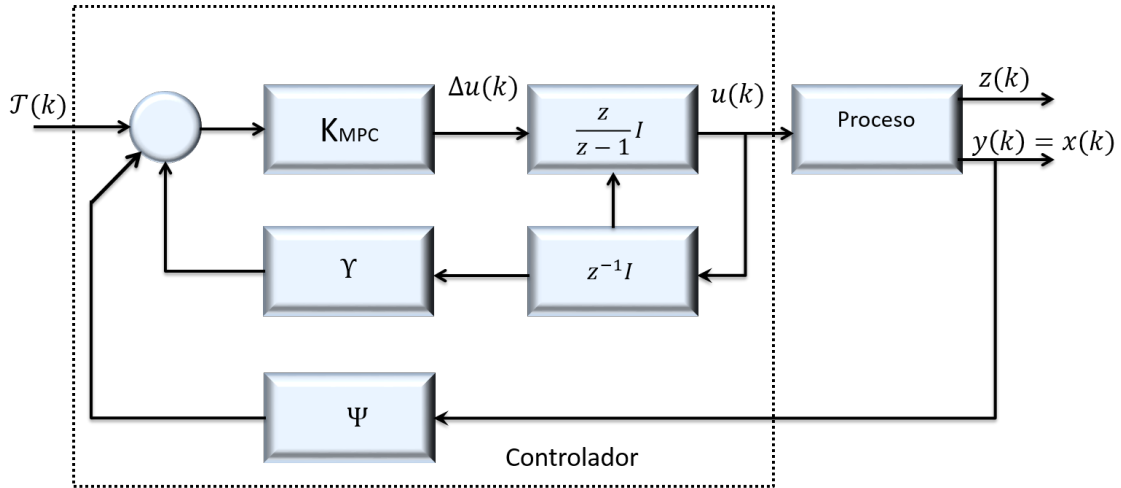


Figura 4.3: Estructura del controlador MPC.

Para el diseño del controlador (Figura 4.3) se estableció un horizonte de predicción $H_p = 5$ y un horizonte de control $H_u = 2$. Estos valores fueron determinados mediante la sintonización del controlador a prueba y error. Además, de las simulaciones del modelo, se sabe que el efecto de las entradas se ve reflejado inmediatamente en la salida del sistema, es decir, que no existen retrasos en el sistema y por lo tanto se estableció $H_w = 1$. El tiempo de muestreo para el control se estableció igual a $T_s = 2$.

Para el desarrollo del sistema de predicción se cuenta con un sistema en tiempo continuo linealizado en un punto de operación (Ver Anexo C):

$$A = \begin{bmatrix} -0,12 & 0,052 \\ 0,22 & -0,97 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0,29E6 & 0 \\ 0 & 3,62E6 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

además, suponiendo que todos los estados son medibles, se define

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Donde el sistema lineal en tiempo discreto es:

$$A_d = \begin{bmatrix} 0,7948 & 0,0393 \\ 0,1722 & 0,1456 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$B_d = \begin{bmatrix} 0,5412E6 & 0,2012E6 \\ 0,0728E6 & 3,2278E6 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$C_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Para realizar el desarrollo del modelo predictivo empleamos las ecuaciones (2.3-2.4) descritas en la sección (1.6.4) con la finalidad de establecer las matrices de predicción Υ , Θ y Ψ , las cuales se describen en (4.11), (4.12) y (4.13) respectivamente.

$$\Upsilon = \begin{bmatrix} 0,5412E6 & 0,2012E6 \\ 0,0728E6 & 3,2278E6 \\ 0,9741E6 & 0,4879E6 \\ 0,1766E6 & 3,7324E6 \\ 1,3223E6 & 0,7356E6 \\ 0,2662E6 & 3,8553E6 \\ 1,6026E6 & 0,9373E6 \\ 0,3392E6 & 3,9158E6 \\ 1,8281E6 & 1,1000E6 \\ 0,3981E6 & 3,9593E6 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} 0,5412E6 & 0,2012E6 & 0 & 0 \\ 0,0728E6 & 3,2278E6 & 0 & 0 \\ 0,9741E6 & 0,4879E6 & 0,5412E6 & 0,2012E6 \\ 0,1766E6 & 3,7324E6 & 0,0728E6 & 3,2278E6 \\ 1,3223E6 & 0,7356E6 & 0,9741E6 & 0,4879E6 \\ 0,2662E6 & 3,8583E6 & 0,1766E6 & 3,7324E6 \\ 1,6026E6 & 0,9373E6 & 1,3223E6 & 0,7356E6 \\ 0,3392E6 & 3,9158E6 & 0,2662E6 & 3,8553E6 \\ 1,8281E6 & 1,1,1000E6 & 1,6026E6 & 0,9373E6 \\ 0,3981E6 & 3,9593E6 & 0,3392E6 & 3,9158E6 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0,7948 & 0,0393 \\ 0,1722 & 0,1456 \\ 0,6384 & 0,0370 \\ 0,1619 & 0,0280 \\ 0,5137 & 0,0305 \\ 0,1335 & 0,0104 \\ 0,4135 & 0,0246 \\ 0,1079 & 0,0068 \\ 0,3329 & 0,0198 \\ 0,0869 & 0,0052 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Posteriormente se determinan las matrices de ponderación \mathcal{Q} y \mathcal{R} empleando las ecuaciones (2.8) y (2.9) descritas en la sección (1.6.4), las matrices de ponderación \mathcal{Q} y \mathcal{R} quedan definidas como se muestran en la ecuación (4.14).

$$\mathcal{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathcal{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Para las matrices adecuadas Υ, Θ, Ψ , donde \mathcal{T} es la referencia deseada definida en la ecuación (2.7), el error de seguimiento queda expresado como se muestra en (4.15) descrito en la sección (1.6.4).

$$\mathcal{E}(k) = \mathcal{T}(k) - \Psi x(k) - \Upsilon u(k-1) \quad (4.15)$$

El error de seguimiento $\mathcal{E}(k)$ que es calculado como se muestra en la ecuación (4.15) queda definido como se muestra en la ecuación (4.16):

$$\mathcal{E}(k) = \begin{bmatrix} -0,3692E8 \\ -2,0021E8 \\ -0,7413E8 \\ -2,3572E8 \\ -1,0509E8 \\ -2,4730E8 \\ -1,3016E8 \\ -2,5431E8 \\ -1,5036E8 \\ -2,5965E8 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Las matrices \mathcal{S}_Q y \mathcal{S}_R descritas en la sección (1.6.4) se definen como:

$$\mathcal{S}_Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathcal{S}_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Después se realiza el calculo de la señal de control óptima por la ecuación (4.18), la cual se calcula en cada iteración.

$$K_{MPC} = [I_l, 0_l, \dots, 0_l] \begin{bmatrix} \mathcal{S}_Q \Theta \\ \mathcal{S}_R \end{bmatrix} \setminus \begin{bmatrix} \mathcal{S}_Q \mathcal{E}(k) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Donde:

$$K_{MPC} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,5412E6 & 0,2012E6 & 0 & 0 \\ 0,0728E6 & 3,2278E6 & 0 & 0 \\ 0,9741E6 & 0,4879E6 & 0,5412E6 & 0,2012E6 \\ 0,1766E6 & 3,7324E6 & 0,0728E6 & 3,2278E6 \\ 1,3223E6 & 0,7356E6 & 0,9741E6 & 0,4879E6 \\ 0,2662E6 & 3,8553E6 & 0,1766E6 & 3,8553E6 \\ 1,6026E6 & 0,9373E6 & 1,3223E6 & 0,7356E6 \\ 0,3392E6 & 3,9158E6 & 0,2662E6 & 3,8553E6 \\ 1,8281E6 & 1,1000E6 & 1,6026E6 & 0,9373E6 \\ 0,3981 & 3,9593E6 & 0,3392E6 & 3,9158E6 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,3692E8 \\ -2,0021E8 \\ -0,7413E8 \\ -2,3572E8 \\ -1,0509E8 \\ -2,4730E8 \\ -1,3016E8 \\ -2,5431E8 \\ -1,5036E8 \\ -2,5965E8 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Donde K_{MPC} es la señal óptima de control que se envía a los actuadores del intercambiador de calor (válvulas de control de agua fría y caliente) para regular la temperatura de agua caliente.

4.3. Control por Modelo de Seguimiento (MFC)

Para desarrollar e implementar el sistema de CTF basado en control por modelo de seguimiento (Figura (4.4)) para el intercambiador de calor de tubos concéntricos, se implementó un sistema FDI y un control por modelo de seguimiento. El sistema FDI se usó para detectar y aislar la falla en el actuador, una vez que esta tarea ha sido realizada y la falla ha sido localizada se reconfigura la ley de control y el sistema FDI envía la información de la falla ocurrida a el bloque de control por modelo de seguimiento para realizar la acomodación para lograr el objetivo de control principal usando el actuador 2 (válvula de control de agua caliente).

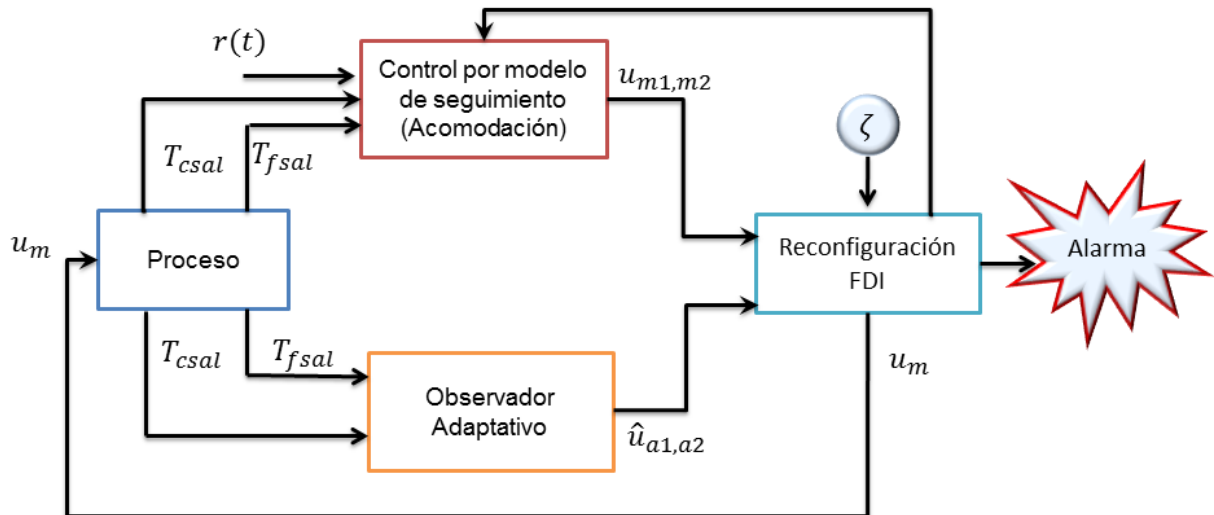


Figura 4.4: CTF utilizando Control por Modelo de Seguimiento

La Figura (4.5) muestra el esquema de control por modelo de seguimiento. Este esquema de control se escogió para recomodar el control del proceso ya que es una de sus ventajas. Por ejemplo, este tipo de esquemas de control permite controlar sistemas MIMO (múltiples entradas-múltiples salidas) a través del uso de un modelo ideal actuando como modelo de referencia al sistema fallado (proceso). Este tipo de sistemas han sido ampliamente usados para realizar tareas de control (Stengel y Huang, 1990) (Hua y Ding, 2011) (Park et al., 2014) (Saglam et al., 2011) y el desarrollo de sistemas de control tolerante a fallas (Cimpoeșu et al., 2011).

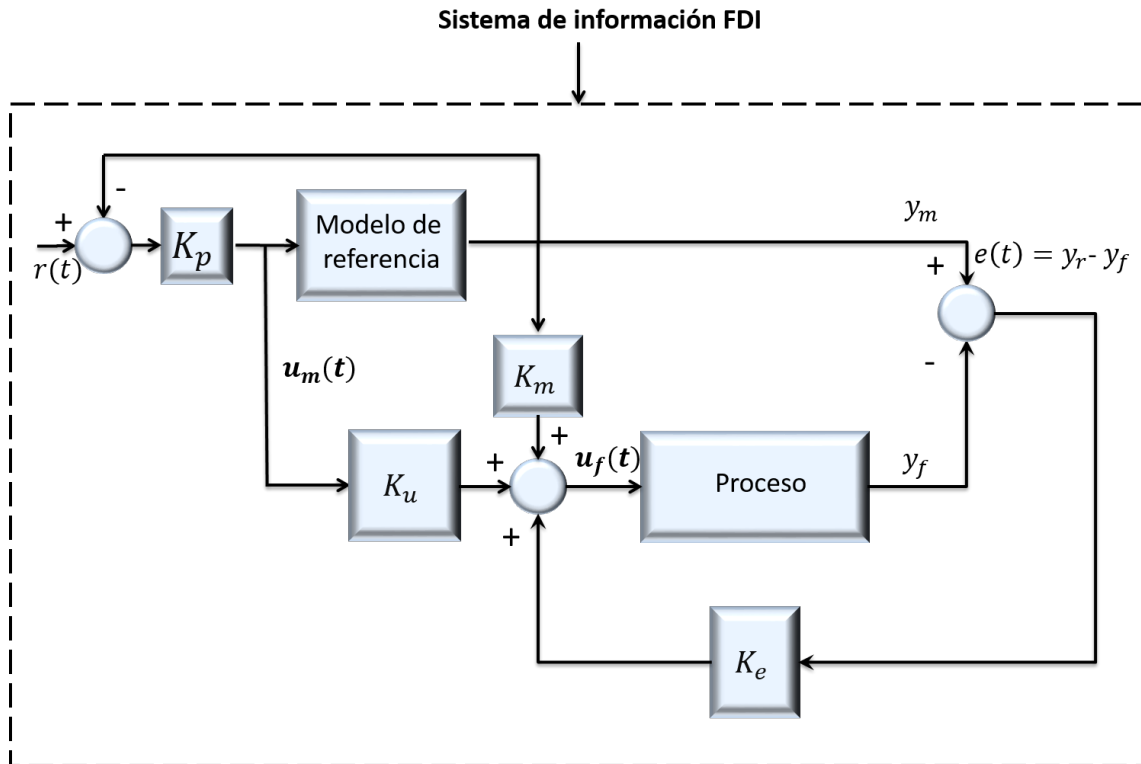


Figura 4.5: Control por modelo de seguimiento.

4.3.1. Desarrollo matemático del control por modelo de seguimiento

Para diseñar el control por modelo de seguimiento en el intercambiador de calor consideramos el modelo de referencia que se muestra en la ecuación (2.24).

Donde el modelo de referencia lineal en tiempo continuo es el siguiente:

$$A_m = \begin{pmatrix} -0,1213 & 0,0524 \\ 0,2295 & -0,9772 \end{pmatrix} \quad B_m = \begin{pmatrix} 1,2983 \times 10^6 & 0 \\ 0 & 3,6263 \times 10^6 \end{pmatrix} \quad C_m = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

En este trabajo se propuso usar un modelo de referencia en lazo cerrado (Ecuación (2.25)) ya que la planta trabaja en diferentes puntos de operación (Ver Figura (4.5)), por lo que para garantizar la disponibilidad de las matrices del intercambiador de calor

en diferentes puntos de referencia la ganancia K_p del lazo cerrado es 3,78. La ganancia de salida de retroalimentación del control se presenta en la ecuación (4.21).

$$K_u = \begin{pmatrix} -0,3740 \times 10^8 & 0 \\ 0 & -0 \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

En la ecuación (2.27) se presenta el modelo con falla, en nuestro caso el modelo representa la falla en el actuador.

Donde

$$A_f = \begin{pmatrix} -0,1165 & 0,0524 \\ 0,2295 & -0,9772 \end{pmatrix} B_f = \begin{pmatrix} 1,2983 \times 10^6 & 0 \\ 0 & 3,6263 \times 10^6 \end{pmatrix} C_f = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

son las matrices que describen el comportamiento del sistema cuando ocurre una falla.

Como se muestra en la Figura (4.5) el error entre la salida del modelo de referencia y la salida de la planta con falla esta dado en la ecuación (4.23).

$$e(t) = y_m(t) - y_f(t) \quad (4.23)$$

Aplicando el Modelo de Seguimiento Explícito (EMF) mostrado en (Cimpoesu et al., 2011), y de acuerdo a la Figura (4.5), la entrada de control de la planta con falla puede obtenerse mediante la ecuación (4.24).

$$\begin{aligned} u_f &= u_f^{stab} + u_f^{corr}(t) \\ u_f &= (k_e e(t)) + (k_m y_m(t) + k_u u_m(t)) \end{aligned} \quad (4.24)$$

donde u_f^{stab} dada en la ecuación (4.25) es la ganancia de estabilización y u_f^{corr} dada

en la ecuación (4.26) es la ganancia de corrección.

$$u_f^{stab}(t) = k_e e(t) \quad (4.25)$$

$$u_f^{corr}(t) = k_m y_m(t) + k_u u_m(t) \quad (4.26)$$

La matriz k_m y k_u se calculan mediante las ecuaciones (2.33) y (2.34) respectivamente. Y quedan definidas de la siguiente forma (4.27).

$$K_m = \begin{pmatrix} 0,6778 \times 10^6 & 0,04004 \times 10^6 \\ 0,0633 \times 10^6 & 0,2821 \times 10^6 \end{pmatrix} K_u = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

Las matrices calculadas se utilizarán posteriormente en la implementación del control tolerante a fallas basado en control por modelo de seguimiento para el funcionamiento del intercambiador de calor aun en presencia de falla de atascamiento en su actuador principal.

Capítulo 5

Implementación del control tolerante a fallas

Este capítulo presenta la implementación del control tolerante a fallas activo en actuadores aplicado al intercambiador de calor, en la sección 5.1 se presentan los resultados obtenidos de la implementación del control tolerante a fallas basado en control predictivo y en la sección 5.2 se muestran los resultados obtenidos del control tolerante a fallas basado en control por modelo de seguimiento.

Para evitar una degradación o daño mayor en el equipo o en los operarios, las fallas deben ser localizadas de manera rápida y realizar una acción para detener su propagación mediante otros elementos de decisión y control cuyo objetivo es hacer un sistema tolerante a fallas, con el cual el sistema es capaz de recuperar su operación luego de la ocurrencia de falla, con algún periodo de desempeño degradado, donde el algoritmo permite adaptar el sistema a la falla para recuperar su desempeño requerido.

5.1. CTF basado en Control Predictivo

Este apartado describe los resultados de la implementación del control tolerante a fallas en actuadores basado en control predictivo en el intercambiador de calor de tubos concéntricos.

La falla inducida vía software en el actuador principal sera del tipo atascamiento, este tipo de fallas se visualizan cuando al actuador se le pide que abra o cierre, según las necesidades del control y dicho actuador se fija en un valor.

Para desarrollar la validación experimental, fueron utilizadas las siguientes condiciones: La temperatura inicial del agua fría fue de 29°C , la temperatura inicial del agua caliente fue 57°C ; el flujo volumétrico inicial se manejó en $4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$; el flujo volumétrico de agua caliente inicial (en condición nominal, sin fallas en el actuador) se operó en $1,35 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

La Figura (5.1) muestra el resultado del control tolerante a fallas aplicado al actuador principal del intercambiador de calor de tubos concéntricos. La Figura (5.1(a)) muestra la variable controlada (temperatura de agua caliente), la Figura (5.1(b)) muestra el flujo volumétrico del agua fría (variable manipulada) y la Figura (5.1(c)) muestra el flujo volumétrico del agua caliente el cual es constante en condiciones nominales, si ocurre una falla en el actuador principal (actuador del agua fría), este se usará para el control de la temperatura del agua caliente.

Del tiempo 0 min hasta el tiempo 50 min el intercambiador de calor se operó en condición nominal sin falla en el actuador. En el tiempo 25 min aproximadamente, se realizó un cambio en el punto de referencia en la temperatura del agua caliente (ver Figura (5.1(a))). También se puede observar la acción de control (ver Figura (5.1(b))) incrementando el valor del flujo volumétrico, permitiendo alcanzar el punto de referencia establecido.

Después, en el tiempo 50 min se realizó otro cambio en el punto de referencia de la temperatura de agua caliente. Sin embargo se puede observar en la Figura (5.1(b)) que la estimación del flujo realizada por el observador (línea continua) sigue a la señal de control hasta el tiempo 52 min en este tiempo se indujo una falla de atascamiento vía software en el actuador 1 (la magnitud de la falla es de $+20\%$). Después de este

tiempo, la estimación del observador del flujo no sigue la señal de control debido a la falla (el sistema FDI se diseñó para detectar una falla en el actuador aproximadamente 5 *min* después de que ocurrió la falla (Figura (5.1(b)) elipse verde), el tiempo puede ser reducido de acuerdo con el diseño, sin embargo la detección de la falla no se puede realizar inmediatamente). Después de 5 *min* de que ocurrió la falla, ésta es detectada y aislada. Para este tiempo, el flujo volumétrico del agua fría permanece constante y el control predictivo acomoda la ley de control para regular la temperatura de agua caliente para lograr el punto de referencia deseado. La Figura (5.1(a)) muestra que debido a la falla en el actuador 1, el objetivo de control no es alcanzado, sino hasta que se realizó la acomodación de la ley de control (aproximadamente en el tiempo 57 *min*).

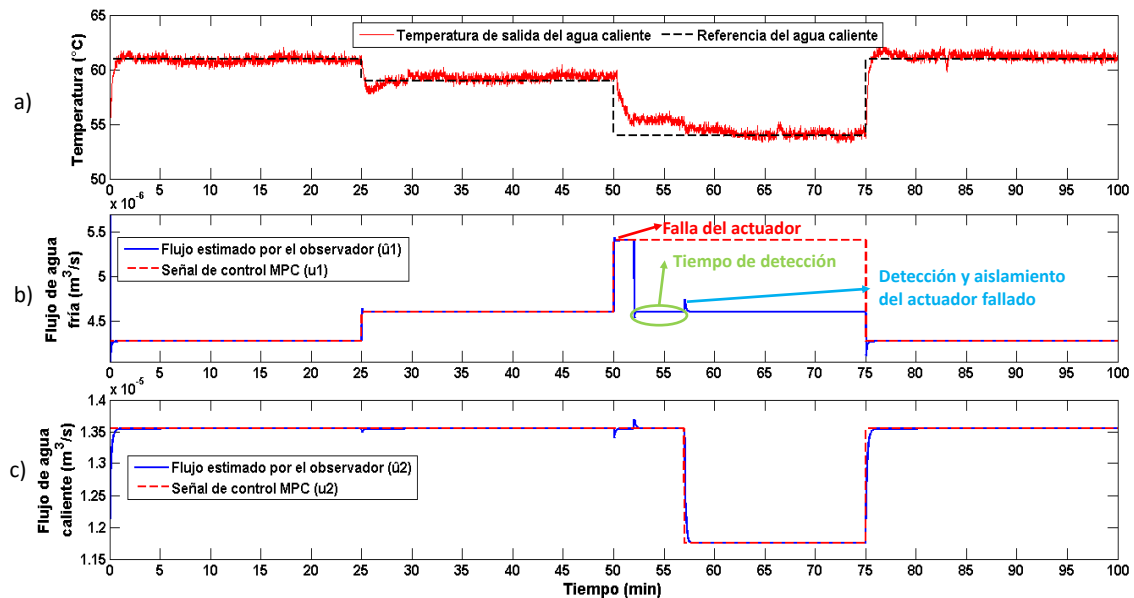


Figura 5.1: Resultados de la implementación del Control Predictivo

5.2. CTF basado en Control por Modelo de Seguimiento

Este apartado describe los resultados de la implementación del control tolerante a fallas en actuadores mediante control por modelo de seguimiento en el intercambiador de calor de tubos concéntricos.

La falla inducida vía software en el actuador principal sera del tipo atascamiento, este tipo de fallas se visualizan cuando al actuador se le pide que abra o cierre, según las necesidades del control y dicho actuador se fija en un valor.

Para desarrollar la validación experimental, fueron utilizadas las siguientes condiciones: La temperatura inicial del agua fría fue de 29°C , la temperatura inicial del agua caliente fue 57°C ; el flujo volumétrico inicial se manejó en $4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$; el flujo volumétrico de agua caliente inicial (en condición nominal, sin fallas en el actuador) se manejó en $1,35 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

La Figura (5.2) muestra el resultado del control tolerante a fallas aplicado al actuador principal del intercambiador de calor de tubos concéntricos. La Figura (5.2(a)) muestra la variable controlada (Temperatura de agua caliente), la Figura (5.2(b)) muestra el flujo volumétrico del agua fría (variable manipulada) y la Figura (5.2(c)) muestra el flujo volumétrico del agua caliente el cual es constante en condiciones nominales, si ocurre una falla en el actuador 1 (Actuador del agua fría), este se usará para el control de la temperatura del agua caliente.

Del tiempo 0 min hasta el tiempo 50 min el intercambiador de calor se operó en condición nominal sin falla en el actuador. En el tiempo 25 min aproximadamente, se realizó un cambio en el punto de referencia en la temperatura del agua caliente (ver Figura (5.2(a))). También se puede observar la acción de control (Ver Figura (5.2(b))) incrementando el valor del flujo volumétrico, permitiendo alcanzar el punto de referencia establecido.

Después, en el tiempo 50 min se realizó otro cambio en el punto de referencia de la temperatura de agua caliente. Sin embargo se puede observar en la Figura ((5.2(b))) que la estimación del flujo realizada por el observador (línea continua) sigue a la señal de control hasta el tiempo 52 min en este tiempo se indujo una falla de atascamiento vía software en el actuador 1 (la magnitud de la falla es de $+20\%$). Después de este

tiempo, la estimación del observador del flujo no sigue la señal de control debido a la falla (el sistema FDI se diseñó para detectar una falla en el actuador aproximadamente 5 *min* después de que ocurrió la falla (Figura (5.2(b)) elipse verde), el tiempo puede ser reducido de acuerdo con el diseño, sin embargo la detección de la falla no se puede realizar inmediatamente). Después de 5 *min* de que ocurrió la falla, ésta es detectada y aislada. Para este tiempo, el flujo volumétrico del agua fría permanece constante y el control por modelo de seguimiento acomoda la ley de control para regular la temperatura de agua caliente para lograr el punto de referencia deseado. La Figura (5.2(a)) muestra que debido a la falla en el actuador 1, el objetivo de control no es alcanzado, sino hasta que se realizó la acomodación de la ley de control (aproximadamente en el tiempo 57 *min*).

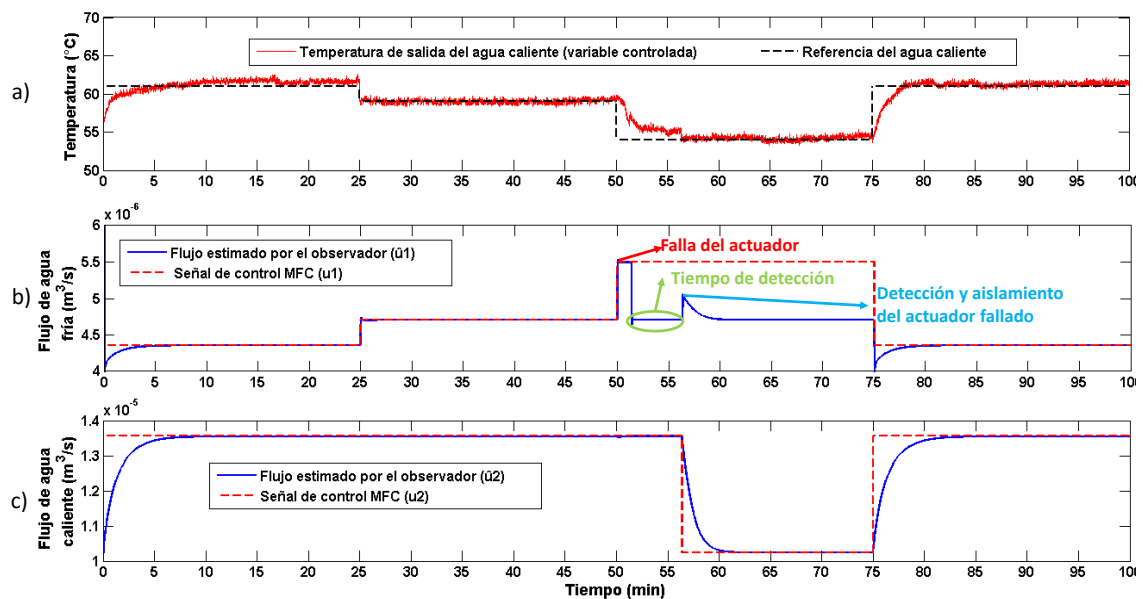


Figura 5.2: Resultados de la implementación del Control por Modelo de Seguimiento

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

6.1. Conclusiones

En este trabajo de tesis se aplicó un sistema de control tolerante a fallas en actuadores a un intercambiador de calor de tubos concéntricos. El sistema de CTF está compuesto por un sistema FDI compuesto por un observador adaptativo no lineal que actúa como un sensor virtual del flujo y la señal de control proporcionada por el controlador (control predictivo o control por modelo de seguimiento), aplicando el esquema propuesto es posible detectar una falla en el actuador, aislar el actuador dañado y mantener controlada la temperatura del agua caliente con el actuador secundario.

Primero se realizó la implementación de un controlador predictivo basado en modelo multivariable (MPC). Los resultados obtenidos muestran la efectividad del esquema propuesto. El control tolerante a fallas mediante el MPC es capaz de mantener en operación el intercambiador de calor aun con una falla de atascamiento en su actuador principal.

También se realizó la implementación de un sistema de control tolerante a fallas basado en control mediante control por modelo de seguimiento (MFC). Los resultados obtenidos muestran el buen desempeño del esquema propuesto. El sistema de control tolerante a fallas mediante MFC fue capaz de mantener en operación continua el proceso aun con falla de atascamiento en el actuador principal.

Las ventajas del esquema propuesto es que no necesitamos un flujometro físico para conocer los flujos, además el proceso puede ser controlado aun si la falla en el actuador ocurre en estado estable o transitorio, el intercambiador de calor puede recuperar las condiciones nominales si el actuador dañado es reemplazado.

Una de las desventajas encontradas al realizar este proyecto de tesis es que se supone que los sensores de temperatura del intercambiador de calor no tendrán fallas, ya que al existir falla en alguno de los sensores de temperatura las estimaciones obtenidas por el observador adaptativo serian erróneas y esto ocasionaría que la unidad de detección y aislamiento de fallas no funcione de manera adecuada.

6.2. Trabajos futuros

Diferentes aspectos pueden seguirse investigando a partir de este trabajo, principalmente las siguientes:

- Implementar un sistema de control tolerante a fallas basado en control predictivo no lineal.
- Diseñar otro tipo de observador que estime los flujos del intercambiador de calor.
- Contemplar fallas de saturación en el actuador.
- Implementar un sistema de control tolerante a fallas en sensores, actuadores y parámetros en el intercambiador de calor.

6.3. Publicaciones realizadas

Revista:

- Carbot-Rojas, D., Escobar, R., Gómez-Aguilar, J., López-López, G., Olivares-Peregrino, V. (2015). Experimental validation of an actuator fault tolerant control system using virtual sensor: Application in a double pipe heat exchanger. *Chemical Engineering Research and Design*, 104:400-408

- RF Escobar; Carbot-Rojas D.A ; J.F. Gómez-Aguilar, V. Alvarado Martínez ,A. C. Téllez Anguiano; J.A. Hernández. Actuator fault tolerant control based on MIMO model predictive control: application in a double pipe heat Exchanger. Enviado. *Chemical Engineering Research and Design*

Congreso:

- Carbot Rojas, D. A., López Castro, M. A., Escobar, R., Gómez Aguilar, J. F., Hernández Pérez, J. A. (2015). Comparación entre modelos matemáticos y estimación de coeficientes de transferencia de calor en línea para un intercambiador de calor. *XXXVI congreso de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química*

Bibliografía

- Agudelo, C., Anglada, F. M., Cucarella, E. Q., and Moreno, E. G. (2013). Integration of techniques for early fault detection and diagnosis for improving process safety: Application to a fluid catalytic cracking refinery process. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(4):660–665.
- Airabella, A. M., Oggier, G. G., Piris-Botalla, L., Falco, C. A., and García, G. O. (2015). Estrategia de detección de fallas de circuito abierto en semiconductores de convertidores cc-cc aislados.
- Anguiano, A. d. C. T., Zaragoza, C. M. A., Reyes, J. R., Castillo, A. Á., and Medina, M. A. (2013). Detección y localización de fallas mediante el uso de observadores no lineales para procesos de copolimerización en emulsión. *Revista Facultad de Ingeniería*, (49):89–100.
- Astorga-Zaragoza, C.-M., Zavala-Río, A., Alvarado, V., Méndez, R.-M., and Reyes-Reyes, J. (2007). Performance monitoring of heat exchangers via adaptive observers. *Measurement*, 40(4):392–405.
- Aufderheide, B., Prasad, V., and Bequette, B. W. (2001). A comparison of fundamental model-based and multiple model predictive control. In *Decision and Control, 2001. Proceedings of the 40th IEEE Conference on*, volume 5, pages 4863–4868. IEEE.
- Bagui, F., Abdelghani-Idrissi, M., and Chafouk, H. (2004). Heat exchanger kalman filtering with process dynamic acknowledgement. *Computers & chemical engineering*, 28(8):1465–1473.
- Bell, J. K. (1983). *Thermal and hydraulic design of heat exchangers*. Hemisphere Publishing Corporation, cop.

- Benosman, M. and Lum, K.-Y. (2010). Passive actuators' fault-tolerant control for affine nonlinear systems. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 18(1):152–163.
- Besaçon, G. (2000). Remarks on nonlinear adaptive observer design. *Systems & control letters*, 41(4):271–280.
- 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.
- Bolívar, A. R. and García, G. (2005). Robust filters for fault detection: An lmi control setting. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*, 28(3).
- Camacho, E. F. and Alba, C. B. (2013). *Model predictive control*. Springer Science & Business Media.
- Camacho, E. F. and Bordons, C. (2004). Control predictivo: Pasado, presente y futuro. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 1(3):5–28.
- Camacho, E. F. and Bordons, C. (2012). *Model predictive control in the process industry*. Springer Science & Business Media.
- Camacho, O., Padilla, D., and Gouveia, J. (2007). Fault diagnosis based on multivariate statistical techniques. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*, 30(3).
- Cavalca, M. S., Galvao, R. K., and Yoneyama, T. (2015). Robust model predictive control using constraint relaxation for fault tolerance. *Control and Intelligent Systems*, 43(1).
- Chen, J. and Patton, R. J. (2012). *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*, volume 3. Springer Science & Business Media.
- Cimpoeșu, E. M., Ciubotaru, B. D., and Popescu, D. (2011). Model following with output feedback for fault tolerant control. In *System Theory, Control, and Computing (ICSTCC), 2011 15th International Conference on*, pages 1–6. IEEE.

- Enriquez-Gonzaga, L. (2011). Detección y diagnóstico de fallas para componentes de un intercambiador de calor empleando el enfoque de modos deslizantes. Master's thesis, CENIDET.
- Escobar, R., Astorga-Zaragoza, C., Juárez-Romero, D., Hernández, J., and Adam-Medina, M. (2009). Estimación en línea del coeficiente de transferencia de calor en un intercambiador de calor. *Asociación Mexicana de Control Automático*.
- Escobar, R., Astorga-Zaragoza, C., Téllez-Anguiano, A., Juárez-Romero, D., Hernández, J., and Guerrero-Ramírez, G. (2011a). Sensor fault detection and isolation via high-gain observers: Application to a double-pipe heat exchanger. *ISA transactions*, 50(3):480–486.
- Escobar, R. F., Astorga-Zaragoza, C., Hernandez, J. A., Adam Medina, M., and Guerrero Ramirez, G. V. (2011b). Design and implementation of an observer-based soft sensor for a heat exchanger. *Dyna*, 78(166):89–97.
- Flores, R. and Asiaín, T. I. (2011). Diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas rotatorias utilizando la técnica de espectros de frecuencia de bandas laterales. *Información tecnológica*, 22(4):73–84.
- García-Morales, J. (2013). Diagnóstico de fallas para componentes de un intercambiador de calor empleando el enfoque de observadores en modos deslizantes super-twisting. Master's thesis, CENIDET.
- Garcia, E. A. and Frank, P. (1997). Deterministic nonlinear observer-based approaches to fault diagnosis: a survey. *Control Engineering Practice*, 5(5):663–670.
- Gertler, J. (1998). *Fault detection and diagnosis in engineering systems*. CRC press.
- Ghesmat, M., Khalkhali, A., and Sykulski, J. (2015). Design of a new nonlinear model predictive fault tolerant control system using multi-sensor data fusion technique based on ukf algorithm. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 34(4).
- Guerrero-Sánchez, M. (2008). Control tolerante a fallas en equipos de transferencia de calor. Master's thesis, CENIDET.

- Hangos, K. M., Bokor, J., and Szederkényi, G. (2006). *Analysis and control of nonlinear process systems*. Springer Science & Business Media.
- Höfling, T. and Isermann, R. (1996). Adaptive parity equations and advanced parameter estimation for fault detection and diagnosis. In *Proceedings of the 13th Triennial World Congress, San Francisco, USA*, pages 55–60.
- Holman, J. P. (1999). *Heat Transfer*. McGraw Hill.
- Hu, X., Karimi, H. R., Wu, L., and Guo, Y. (2014). Model predictive control-based non-linear fault tolerant control for air-breathing hypersonic vehicles. *IET Control Theory & Applications*, 8(13):1147–1153.
- Hua, C.-C. and Ding, S. X. (2011). Model following controller design for large-scale systems with time-delay interconnections and multiple dead-zone inputs. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 56(4):962–968.
- Ichtev, A., Hellendoom, J., Babuška, R., and Mollov, S. (2002). Fault-tolerant model-based predictive control using multiple takagi-sugeno fuzzy models. In *Fuzzy Systems, 2002. FUZZ-IEEE'02. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 346–351. IEEE.
- Jin, X., Yang, G., and Li, Y. (2010). Robust fault-tolerant controller design for linear time-invariant systems with actuator failures: an indirect adaptive method. *Journal of Control Theory and Applications*, 8(4):471–478.
- Jonsson, G. R., Lalot, S., Palsson, O. P., and Desmet, B. (2007). Use of extended kalman filtering in detecting fouling in heat exchangers. *International journal of heat and mass transfer*, 50(13):2643–2655.
- Kanoh, H. (1982). Distributed parameter heat exchangers modeling, dynamics and control. *Pergamon Press, New York*.
- Kerrigan, E. and Maciejowski, J. (1999). Fault-tolerant control of a ship propulsion system using model predictive control. In *Proceedings of European control conference*. Citeseer.

- Lao, L., Ellis, M., and Christofides, P. D. (2013). Proactive fault-tolerant model predictive control. *AIChE Journal*, 59(8):2810–2820.
- Liu, M., Ho, D. W., and Shi, P. (2015). Adaptive fault-tolerant compensation control for markovian jump systems with mismatched external disturbance. *Automatica*, 58:5–14.
- López, B. L., Medina, M. A., Escobar, R., and Zaragoza, C. (2009). Diagnóstico de fallas en intercambiadores de calor: enfoque multi-modelos.
- López-Zapata, B. (2009). Desarrollo de un sistema de detección de fallas utilizando un enfoque multi-modelos lti aplicado a un intercambiador de calor. Master’s thesis, CENIDET.
- Luo, X., Guan, X., Li, M., and Roetzel, W. (2003). Dynamic behaviour of one-dimensional flow multistream heat exchangers and their networks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(4):705–715.
- Luyben, W. L. (1989). *Process modeling, simulation and control for chemical engineers*. McGraw-Hill Higher Education.
- Maciejowski, J. and Jones, C. (2003). Mpc fault-tolerant flight control case study: Flight 1862. In *Proceedings of the International Federation of Automatic Control on Safeprocess Symposium*, number EPFL-CONF-169763, pages 119–124.
- Maciejowski, J. M. (2000). Fault-tolerant aspects of mpc.
- Majanne, Y. and Lautala, P. (2003). Model predictive fault tolerant control scheme. *Tampere University of Technology, Institute of Automation and Control*.
- Malleswararao, Y. and Chidambaram, M. (1992). Non-linear controllers for a heat exchanger. *Journal of Process Control*, 2(1):17–21.
- Martínez, C. A. O. (2007). *Model predictive control of complex systems including fault tolerance capabilities: application to sewer networks*. PhD thesis, Technical University of Catalonia.

- Masada, G. and Wormley, D. (1983). Evaluation of lumped parameter heat-exchanger dynamic-models. In *MECHANICAL ENGINEERING*, volume 105, page 90. ASME-AMER SOC MECHANICAL ENG 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017.
- Miksch, T., Gambier, A., and Badreddin, E. (2008). Real-time implementation of fault-tolerant control using model predictive control. In *World Congress*, volume 17, pages 11136–11141.
- Ocampo-Martinez, C., De Doná, J. A., and Seron, M. (2010). Actuator fault-tolerant control based on set separation. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 24(12):1070–1090.
- Park, J.-W., Im, W.-S., Kim, D.-Y., and Kim, J.-M. (2014). Safe driving algorithm of the electric wheelchair with model following control. In *Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe), 2014 16th European Conference on*, pages 1–10. IEEE.
- Patan, K. (2015). Neural network-based model predictive control: Fault tolerance and stability. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 23(3):1147–1155.
- 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.
- Persin, S. and Tovornik, B. (2005). Real-time implementation of fault diagnosis to a heat exchanger. *Control engineering practice*, 13(8):1061–1069.
- Prakash, J., Narasimhan, S., and Patwardhan, S. C. (2005). Integrating model based fault diagnosis with model predictive control. *Industrial & engineering chemistry research*, 44(12):4344–4360.
- Puig, V., Quevedo, J., Escobet, T., Morcego, B., and Ocampo, C. (2004). Control tolerante a fallos (parte i): fundamentos y diagnóstico de fallos. *Revista Iberoamericana de automática e informática industrial*, 1(1):15–31.

- Rahman, M. and Devanathan, R. (1994). Modelling and dynamic feedback linearisation of a heat exchanger model. In *Control Applications, 1994., Proceedings of the Third IEEE Conference on*, pages 1801–1806. IEEE.
- Rodrigues, M., Theilliol, D., and Sauter, D. (2006). Active actuator fault tolerant control design for polytopic lpv systems. In *Proc. Proc. 6th IFAC Symposium Safe-process, Beijing, China*.
- Rodríguez Aguilar, L., Cedeño, M., and Sánchez, M. (2014). Diseño de redes de sensores para diagnóstico de fallas utilizando análisis de componentes principales. In *XLIII Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa (43JAIIO)-III Argentine Symposium on Industrial Informatics (SII)(Buenos Aires, 2014)*.
- Rossiter, J. A. (2013). *Model-based predictive control: a practical approach*. CRC press.
- Saglam, C. O., Baran, E., Nergiz, A. O., Sabanovic, A., et al. (2011). Model following control with discrete time smc for time-delayed bilateral control systems. In *Mechanics (ICM), 2011 IEEE International Conference on*, pages 997–1002. IEEE.
- Shibasaki, H., Yusof, R., and Ishida, Y. (2015). A design method of a model-following control system. *International Journal of Control, Automation and Systems*, pages 1–10.
- Spreitzer, K. and Balle, P. (2000). A multi-model approach for detection and isolation of sensor and process faults for a heat exchanger. In *American Control Conference, 2000. Proceedings of the 2000*, volume 4, pages 2730–2734. IEEE.
- Steiner, M. (1989). Low order dynamic models of heat exchangers. In *Proc. Of the International Symposium on District Heat Simulations, Reykjavik, Iceland*.
- Stengel, R. F. and Huang, C. Y. (1990). Restructurable control using proportional-integral implicit model following. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 13(2):303–309.
- Taniguchi, T., Eciolaza, L., and Sugeno, M. (2014). Model following control of a unicycle mobile robot via dynamic feedback linearization based on piecewise bilinear

- models. In *Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*, pages 539–548. Springer.
- Tong, S., Huo, B., and Li, Y. (2014). Observer-based adaptive decentralized fuzzy fault-tolerant control of nonlinear large-scale systems with actuator failures. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, 22(1):1–15.
- Valencia, F. A. and Estupiñan, J. A. (2015). Sistema difuso para la detección y diagnóstico de falla en la generación a vapor. *Scientia et Technica*, 20(1):4–9.
- Varga, E., Hangos, K., and Szigeti, F. (1995). Controllability and observability of heat exchanger networks in the time-varying parameter case. *Control Engineering Practice*, 3(10):1409–1419.
- Villada, F. and Cadavid, D. R. (2007). Diagnóstico de fallas en motores de inducción mediante la aplicación de redes neuronales artificiales. *Información tecnológica*, 18(2):105–112.
- Wang, D. and Wu, S. (2015). Design of the mfcs in cutting systems with time-delay. In *2015 International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference*. Atlantis Press.
- Wang, Z., Rodrigues, M., Theilliol, D., and Shen, Y. (2015). Fault tolerant control for discrete linear systems with consideration of actuator saturation and performance degradation. In *9th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes At Paris, ENSAM*.
- Weyer, E., Szederkényi, G., and Hangos, K. (2000). Grey box fault detection of heat exchangers. *Control engineering practice*, 8(2):121–131.
- Williams, T. J. and Morris, H. J. (1960). *A survey of the literature on heat exchanger dynamics and control*. American Institute of Chemical Engineers.
- Winsor, C., Roy, R. J., et al. (1970). The application of specific optimal control to the design of desensitized model following control systems. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 15(3):326–333.

- Witczak, M., Buciakowski, M., and Aubrun, C. (2015). Predictive actuator fault-tolerant control under ellipsoidal bounding. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*.
- Yang, H., Jiang, B., Staroswiecki, M., and Zhang, Y. (2015). Fault recoverability and fault tolerant control for a class of interconnected nonlinear systems. *Automatica*, 54:49–55.
- Yang, X. and Maciejowski, J. M. (2015). Fault tolerant control using gaussian processes and model predictive control. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 25(1):133–148.
- Young, K.-k. D. (1978). Design of variable structure model-following control systems. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 23(6):1079–1085.
- Zamarrón, A. and Rodríguez, S. (2015). Diagnóstico de fallas en el motor de inducción usando lógica difusa.
- Zeng, Y., Xing, Y.-R., Ma, H.-J., and Yang, G.-H. (2015). Adaptive fault diagnosis for robot manipulators with multiple actuator and sensor faults. In *Control and Decision Conference (CCDC), 2015 27th Chinese*, pages 6569–6574. IEEE.
- Zhang, D. and Yu, L. (2012). Fault-tolerant control for discrete-time switched linear systems with time-varying delay and actuator saturation. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 153(1):157–176.
- Zhang, R., Lu, J., Qu, H., and Gao, F. (2014). State space model predictive fault-tolerant control for batch processes with partial actuator failure. *Journal of Process Control*, 24(5):613–620.
- Zhang, Y. and Jiang, J. (2008). Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual reviews in control*, 32(2):229–252.

Anexos

Anexo A

Instrumentación del intercambiador de calor

La planta piloto del intercambiador de calor de tubos concéntricos fue producida por la empresa Didatec Technologies y está localizado en el Laboratorio de mecatrónica de CENIDET. La planta opera como un proceso de enfriamiento.

La planta piloto está conformada por la siguiente instrumentación:

- T_{fent} y T_{cent} son medidas por dos RTD Pt-100 con cuatro cables.
- T_{fsal} y T_{csal} son medidas por dos RTD Pt-100 con tres cables.
- F_{fent} y F_{cent} son medidos por dos flujómetros Platon de sección variable, y no hay una señal digital por parte de los flujómetros.

RTD	$\leq \mp 0,2^{\circ}C$ y $0,1 \frac{^{\circ}C}{\Omega}$
Lin.R	$\leq \mp 0,1^{\circ}\Omega$ y $\leq \mp 0,01 \frac{m\Omega}{^{\circ}C}$
Volt	$\leq \mp 10^{\circ}\mu V$ y $\leq \mp 1 \frac{\mu V}{^{\circ}C}$
Rango de temperatura RTD 3c	$-40^{\circ}C$ a $85^{\circ}C$
Rango de temperatura RTD 4c	$0^{\circ}C$ a $100^{\circ}C$
Peso	50g
Resistencia de cada cable (max)	5 Ω
Corriente de salida del sensor	0,2mA a 0,4mA
Dimensiones	44 × 20,2mm

Tabla A.1: Valores del RTD Pt-100.

Los valores básicos del RTD Pt-100 están dados en la Tabla (A). La instrumentación de la planta es suficiente para desarrollar el monitoreo completo de la planta, pero no es suficiente para tareas de control automáticas, puesto que el caudal no puede ser registrado por el sistema de adquisición. En la planta piloto de Didatec Technologies, los flujos de agua fría y caliente no son medidos por un transmisor digital (El flujo frío es manipulado y el flujo caliente se mantiene constante). Además, el sistema no está equipado con una interfaz gráfica que permita a los usuarios visualizar los datos dados por la instrumentación mencionada y/o el control de los actuadores de la planta.

Anexo B

Caracterización de las válvulas de control

La ecuación (B.1) representa la ecuación de interpolación de Lagrange, se usó para relacionar el flujo volumétrico a través de las válvulas y la señal de voltaje como una medida de la apertura de las válvulas. Con esta caracterización de las válvulas aseguramos la manipulación correcta de ambas válvulas de control (corriente de agua fría y corriente de agua caliente). Este algoritmo calcula el voltaje a partir de la señal de control (en este trabajo puede ser el agua fría o el agua caliente) proporcionado por la ley de control. En el caso nominal (sin falla) la variable manipulada es el flujo de agua fría y en el caso de falla la variable manipulada es el flujo de agua caliente.

$$\begin{aligned} f(x_k) &= P_n(x_k) \quad k = 0, 1, 2, \dots, n \\ P_n(x) &= f(x_0)L_{n,0}(x) + f(x_1)L_{n,1}(x) + \dots + f(x_n)L_{n,n}(x) \\ L_{n,x}(x) &= \frac{(X - X_0)(X - X_1) \cdots (X - X_{k+1}) \cdots (X - X_n)}{(X_K - X_0)(X_K - X_1) \cdots (X_K - X_{K+1}) \cdots (X - X_n)} \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

Donde x_k es la variable independiente, $f(x_k)$ es la aproximación de la variable independiente, $L_{n,k}(x)$ es una base polinómica y $P_n(x)$ es la interpolación polinómica de Lagrange.

En la Figura (B.1) se muestra el resultado del actuador 1 y en la Figura (B.2) se

muestra el resultado del actuador 2.

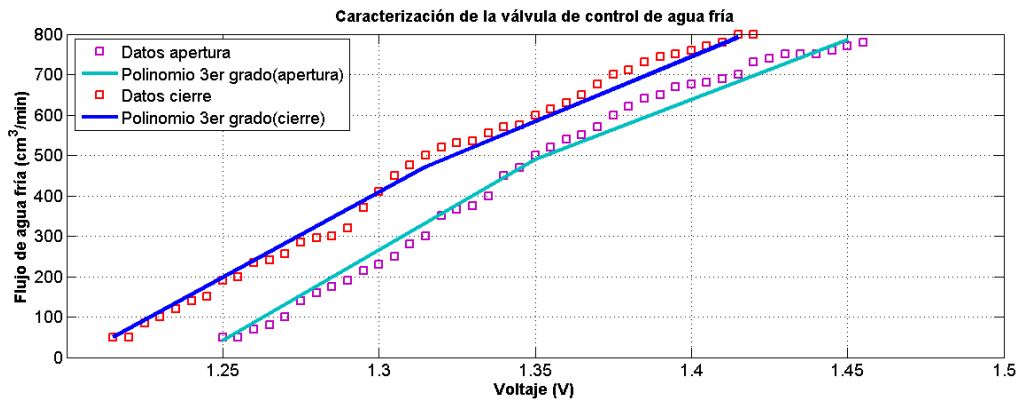


Figura B.1: Caracterización de la válvula de control de agua fría (Datos experimentales y aproximación).

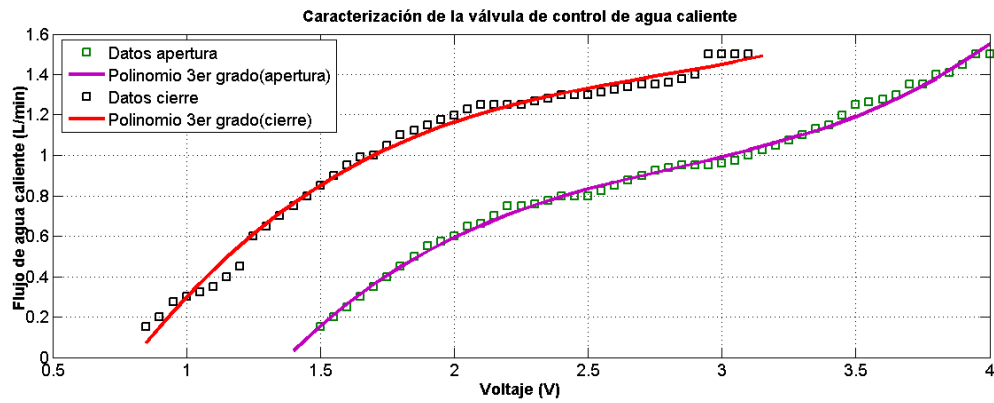


Figura B.2: Caracterización de la válvula de control de agua caliente (Datos experimentales y aproximación).

Anexo C

Linealización del modelo no lineal del IC

Se llevó a cabo la linealización del modelo de parámetros agrupados descrito por las ecuaciones (C.1), por el método de expansión de series de Taylor. Esto con el fin de obtener un modelo lineal para posteriormente ser utilizado en la implementación del CTF utilizando control por modelo de seguimiento y control predictivo.

Como se mencionó en el capítulo 1, la dinámica del intercambiador de calor se obtiene por un balance de energía para cada uno de los lados del intercambiador de calor, dada en la ecuación (C.1):

$$\begin{aligned}\frac{dT_{fsal}}{dt} &= \frac{F_{fent}}{V_f} (T_{fent} - T_{fsal}(t)) + \frac{UA}{\rho_f C_{pf} V_f} (T_{csal}(t) - T_{fsal}(t)) \\ \frac{dT_{csal}}{dt} &= \frac{F_{cent}}{V_c} (T_{cent} - T_{csal}(t)) + \frac{UA}{\rho_c C_{pc} V_c} (T_{fsal}(t) - T_{csal}(t))\end{aligned}\tag{C.1}$$

El modelo matemático, que se muestra en la ecuación (C.1), tiene en cuenta las siguientes suposiciones:

- Volumen constante en ambos tubos.
- El coeficiente de transferencia de calor está relacionado con las temperaturas de los fluidos y con el flujo y no es considerado constante.

- No existe transferencia de calor entre el tubo externo y el medio ambiente.
- No hay almacenamiento de energía calorífica en las paredes de los tubos.
- Las temperaturas de entrada son medibles.

Para mostrar la metodología utilizada para la linealización, el punto de operación alrededor del cual se realizó la linealización corresponde al estado estable de la simulación del modelo con una temperatura del agua caliente de 81°C y la temperatura del agua fría de 29°C. En la Tabla (C) se presentan los valores del punto de operación alrededor del cual se linealizó.

Parámetro	Valor	Unidad
T_{fent}	29	°C
T_{cent}	81	°C
F_{fent}	$6,67E^{-6}$	$\frac{m^3}{s}$
F_{cent}	$1,67E^{-5}$	$\frac{m^3}{s}$
C_{pf}	$4,1792E^3$	$\frac{J}{kg \cdot C}$
C_{pc}	$4,1903E^3$	$\frac{J}{kg \cdot C}$
ρ_f	988,8765	$\frac{kg}{m^3}$
ρ_c	975,8725	$\frac{kg}{m^3}$
V_f	$9,6792E^{-5}$	m^3
V_c	$2,2337E^{-5}$	m^3
U	1055,9	$\frac{W}{m^2 \cdot C}$
A	0,0199	m^2

Tabla C.1: Parámetros utilizados para la linealización.

Ya que el punto de operación es un estado estable del sistema, es decir $dX/dt|_{x_0, U_0, t} = f(X_0, U_0, t) = 0$, entonces, de la linealización se obtiene un sistema de la forma (C.2) donde A y B están definidos como:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (C.2)$$

donde:

$$A = \frac{\partial f}{\partial X}|_{(X_0, U_0, t)} \quad (C.3)$$

$$B = \left. \frac{\partial f}{\partial U} \right|_{(X_0, U_0, t)} \quad (\text{C.4})$$

Entonces $f(X, U, t)$ es el sistema descrito en (3.7) y $X = [T_{fsal} \ T_{csal}]$ es el vector de estados del sistema. Además $U = [F_{fent} \ F_{csal}]$ es el vector de entradas del sistema.

Sustituyendo los valores del punto de operación presentados en la Tabla (C) se obtienen las matrices A y B , las cuales quedaron de la siguiente manera:

$$A = \begin{bmatrix} -0,1213 & 0,0524 \\ 0,2295 & -0,9772 \end{bmatrix} \quad (\text{C.5})$$

$$B = \begin{bmatrix} 0,2996E - 6 & 0 \\ 0 & 3,6263E - 6 \end{bmatrix} \quad (\text{C.6})$$

además, suponiendo que todos los estados son medibles, se define

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{C.7})$$

Así, el sistema linealizado en el punto de operación es:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (\text{C.8})$$

con A , B y C definidos en (C.5) - (C.7).

Anexo D

Interfaz gráfica en LabVIEW

El software de programación seleccionado para desarrollar la interfaz de monitoreo es LabVIEW, ya que nos provee con algoritmos para desarrollar fácilmente las tareas remotas de monitoreo y el monitoreo de los sistemas de control, además de contar con una interfaz gráfica fácil de usar, razón por la cual se seleccionó una tarjeta de adquisición de National Instruments ($NI^{\text{©}}$) para comunicar la información del intercambiador de calor con la computadora.

La tarjeta usada en este trabajo para la adquisición es NI USB-6008. Fue seleccionada porque está conformada por 8 entradas analógicas, suficientes para adquirir todas las variables involucradas en el proceso; y tiene dos salidas analógicas para enviar la información requerida por el sistema de control de los actuadores.

La interfaz diseñada es capaz de desarrollar las siguientes tareas:

- Monitorear las temperaturas de entrada y salida.
- Estimar las temperaturas de salida, usando un modelo del intercambiador de calor o por un observador adaptable para estimar las temperaturas de salida y los flujos de entrada al sistema para implementar un sistema de detección y diagnóstico de fallas.
- Desarrollar un sistema de Control Tolerante a fallas en actuadores para continuar operando el sistema aun en presencia de falla en el actuador principal.

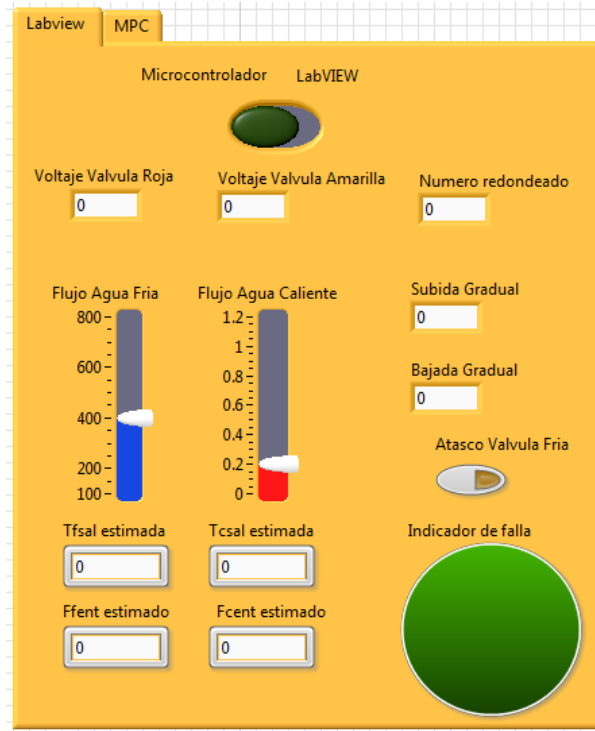


Figura D.1: Interfaz gráfica (control).

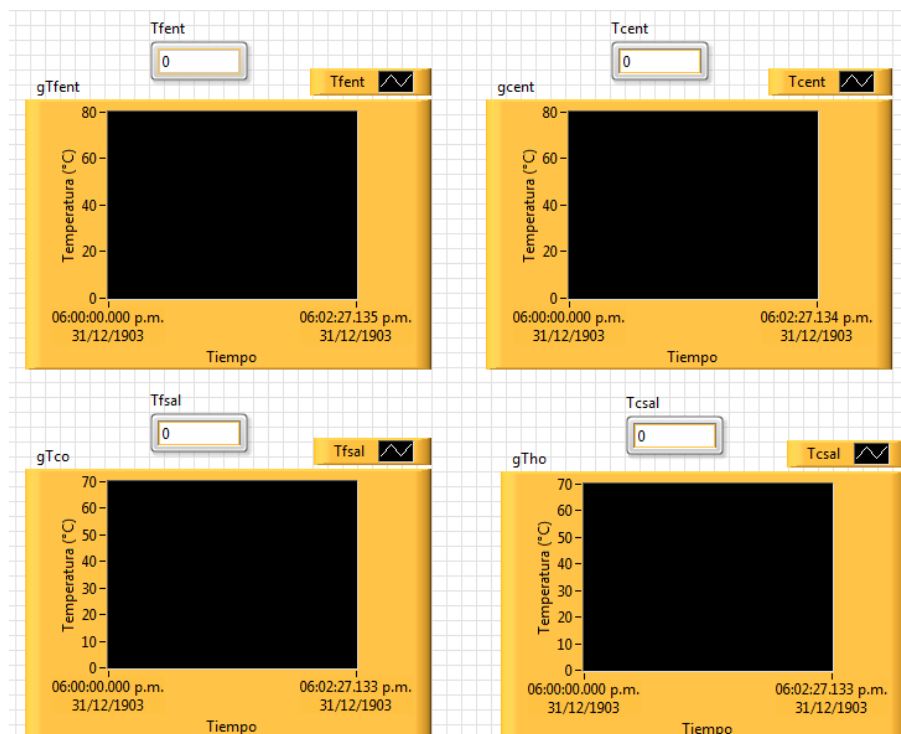


Figura D.2: Interfaz gráfica (monitoreo).

Anexo E

Publicaciones realizadas



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](http://www.sciencedirect.com)

Chemical Engineering Research and Design

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cherd

 IChemE
 ADVANCING
 CHEMICAL
 ENGINEERING
 WORLDWIDE

Experimental validation of an actuator fault tolerant control system using virtual sensor: Application in a double pipe heat exchanger



D.A. Carbot-Rojas^a, R.F. Escobar^{b,*}, J.F. Gómez-Aguilar^c, G. López-López^b, V.H. Olivares-Peregrino^b

^a Posgrado Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico – Tecnológico Nacional de México, Int. Internado Palmira S/N, Palmira C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, Mexico

^b Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico – Tecnológico Nacional de México, Int. Internado Palmira S/N, Palmira C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, Mexico

^c Cátedras CONACYT-Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Int. Internado Palmira S/N, Palmira C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, Mexico

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 July 2015

Received in revised form 27 August 2015

Accepted 28 August 2015

Available online 7 September 2015

Keywords:

Fault tolerant control

Actuator fault

Heat exchanger

ABSTRACT

This work presents an actuator fault tolerant control (FTC) system applied in a counter-current double pipe heat exchanger. The heat exchanger has two input variables which are, cold and hot water flow rates. The main actuator manipulates the cold water flow rate in order to control the hot water temperature. The goal of this work is to keep in continuous operation the counter-current double pipe heat exchanger, even if the main actuator is stuck-open. In case of failure on the main actuator, it is proposed to control the process with the second input variable (by manipulating the hot water flow rate). To achieve our aim, we designed an FTC system based in a fault detection and isolation (FDI) system and a Model Following Control (MFC). To develop the FDI system an adaptive nonlinear observer to estimate the flow rates in the heat exchanger for both streams (hot and cold) was implemented. The FDI is performed by the comparison between the flow rate estimation (by the adaptive nonlinear observer) and the flow rate provided by the control law. The nonlinear flow rate estimation is needed because the real plant does not have digital flowmeters to measure the flow rates online. The FDI system allows to detect and isolate the fault actuator then, the control signal and the failure accommodation is realized by the MFC. The results showed that it is possible to keep the heat exchanger in continuous operation even if the main actuator is stuck-open.

© 2015 The Institution of Chemical Engineers. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The new technological issues for processes have sophisticated control systems to keep the quality, the efficiency of the processes and safety for the operators and the equipment. A conventional feedback control designed for complex systems can be inefficient and/or unstable if an actuator or sensor fault occurs during the processes operation. To supervise a

process and analyze a possible failure in a sensor, actuator or equipment, there are different control approaches to detect, diagnose and/or isolate a fault. These kinds of systems are called Fault Detection and Diagnosis (FDD), fault detection and isolation.

For a dynamic process, the FDD is a technique used to detect a failure in the process or in a physical element of the equipment, such as a sensor or an actuator. Furthermore, this

* Corresponding author. Tel.: +52 777 3627770; fax: +52 777 3627795.

E-mail address: esjiri@cenidet.edu.mx (R.F. Escobar).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2015.08.029>

0263-8762/© 2015 The Institution of Chemical Engineers. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

Actuator fault tolerant control based on multi-input multi-output model predictive control: application in a double pipe heat Exchanger

R. F. Escobar^{a,1}, D.A. Carbot-Rojas^b, J.F. Gómez-Aguilar^c, V. Alvarado Martínez^a, A.C. Téllez Anguiano^d, J.A.Hernández^e

^a*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - Tecnológico Nacional de Mexico. Int. Internado Palmira S/N, Palmira C.P.62490, Cuernavaca, Morelos, Mexico*

^b*Posgrado Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - Tecnológico Nacional de Mexico. Int. Internado Palmira S/N, Palmira C.P.62490, Cuernavaca, Morelos, Mexico*

^c*Cátedras CONACYT-Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Int. Internado Palmira S/N, Palmira C.P.62490, Cuernavaca, Morelos, Mexico*

^d*Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Michoacán, CP. 58120. Mexico.*

^e*Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas-Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, C.P. 62209, Cuernavaca, Morelos, Mexico*

Abstract

In this work an experimental fault tolerant control (FTC) implementation is presented. The fault tolerant control is based on a multi-input multi-output (MIMO) model predictive control (MPC). The aim of the fault tolerant control is to keep on operating a double pipe counter-current heat exchanger even if the main actuator of the heat exchanger is stuck open. To realize the FTC, there was implemented an adaptive observer in order to design a fault detection and diagnosis (FDI) system. In the FDI system, the cold and hot water flow rate estimations by the adaptive

¹Corresponding author. Fax: +52 777 3627795. E-mail: esjiri@cenidet.edu.mx (R. F. Escobar)

COMPARACIÓN ENTRE MODELOS MATEMÁTICOS Y ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

Diego Alessis Carbot Rojas^a, Marcos Alfredo López Castro^a, R. F. Escobar^b, J. F. Gómez-Aguilar^b, J. A. Hernández Pérez^c

^a Posgrado en Ingeniería Electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira S/N, Palmira C.P. 62490, Cuernavaca, Mor., México.

^b Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - Tecnológico Nacional de México, Interior Internado Palmira S/N, Palmira C.P. 62490, Cuernavaca, Mor., México.

^c Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, C.P. 62209 Cuernavaca, Morelos, México

Resumen

En este trabajo se presenta la comparación de dos modelos matemáticos para la estimación de temperaturas en un intercambiador de calor de tubos concéntricos con flujos a contra corriente y sin cambio de fase. Uno de los modelos es representado por ecuaciones diferenciales ordinarias y el otro modelo por ecuaciones diferenciales parciales. Para realizar la estimación de las temperaturas en el modelo de ecuaciones diferenciales ordinarias, se consideraron dos diferentes métodos para el cálculo del coeficiente global de temperatura en modelo termodinámico, el primero es descrito por una sola ecuación que describe de forma global la transferencia de calor entre ambas corrientes y el segundo método considera el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor para cada una de las corrientes. Por otra parte, en el modelo de ecuaciones diferenciales parciales se empleó un modelo termodinámico donde se calcula el coeficiente de transferencia de calor convectivo para cada una de las corrientes del intercambiador de calor (interna y externa).

Palabras clave: Estimación de temperatura, Intercambiador de calor, modelado matemático.

Introducción

Los modelos de parámetros agrupados son ampliamente usados para describir la dinámica de un sistema en función del tiempo, así como, para realizar el diseño de un controlador, su representación es a través de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO). Por otro lado, los modelos de parámetros distribuidos son aquellos que toman en cuenta los cambios de las variables en tiempo y en espacio y son representados por un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales (EDP).

En los trabajos presentados en [1-3] se propone el uso del modelo matemático que representa la transferencia de calor mediante el uso de un par de ecuaciones diferenciales ordinarias, considerando el coeficiente global de transferencia de calor (U) constante, así como las propiedades físicas del agua (ρ y C_p). Sin embargo, en [4] y [5] se mostró que para que el modelo del intercambiador de calor fuera válido en un amplio rango de operación, el coeficiente de transferencia de calor tenía que ser estimado y que éste dependía del flujo del fluido y de la temperatura. Por lo tanto, si se trabaja con un modelo que considere el coeficiente global de transferencia de calor como constante, el modelo únicamente será válido en una vecindad de valores cercanos a los valores considerados para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor. En [6] se utiliza un modelo matemático que representa la transferencia de calor mediante ecuaciones diferenciales parciales en el cual los coeficientes convectivos (h_i, h_e) se mantienen constantes, y al usar los coeficientes convectivos como constantes el modelo tienen un error mayor en la estimación de las temperaturas de salida. Para desarrollar la comparación entre los dos modelos matemáticos se consideraron los dos propuestos en la literatura [1] y [6], el modelo empleado en [1], considera el coeficiente global de transferencia de calor constante, mientras que para el caso del modelo propuesto en [6] se emplean los coeficientes convectivos de transferencia de calor para cada corriente, en donde los coeficientes convectivos son considerados como constantes.

En este trabajo se realizará la comparación de estos dos modelos dinámicos [1] y [6], con una modificación en el modelo termodinámico de ambos modelos dinámicos, esta modificación consiste en

- (Höfling and Isermann, 1996)
(Zhang and Jiang, 2008)
(Chen and Patton, 2012)
(Garcia and Frank, 1997)
(Camacho and Alba, 2013)
(Rahman and Devanathan, 1994)
(Malleswararao and Chidambaram, 1992)
(Valencia and Estupiñan, 2015)
(Zamarrón and Rodríguez, 2015)
(Flores and Asiaín, 2011)
(Villada and Cadavid, 2007)
(Bolívar and García, 2005)
(Persin and Tovornik, 2005)
(Spreitzer and Balle, 2000)
(Zhang and Yu, 2012)
(Benosman and Lum, 2010)
(Yang and Maciejowski, 2015)
(Maciejowski and Jones, 2003)
(Wang and Wu, 2015)
(Hua and Ding, 2011)
(Stengel and Huang, 1990)
(Masada and Wormley, 1983)
(Williams and Morris, 1960)
(Stengel and Huang, 1990)
(Majanne and Lautala, 2003)