

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



RECOBRO DE SENSIBILIDAD A CIERTAS FALLAS  
MULTIPLICATIVAS DE LOS GENERADORES DE  
RESIDUOS BASADOS EN OBSERVADORES

POR

ING. JESUS ENRIQUE PAEZ CASTILLO

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON  
ESPECIALIDAD EN CONTROL.

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L., A ENERO DEL 2003

TM  
Z5B53  
.M2  
FIME  
2003  
.P3

RECOMMEND THE STRONGEST AND CHEAPEST FILMS AVAILABLE. SURELY

THE BEST COMPANY MAKES THE BEST FILMS FOR SUBSCRIBERS.

THE BEST COMPANY MAKES THE BEST FILMS FOR SUBSCRIBERS.

THE BEST COMPANY MAKES THE BEST FILMS FOR SUBSCRIBERS.

THE BEST COMPANY MAKES THE BEST FILMS FOR SUBSCRIBERS.

THE BEST COMPANY MAKES THE BEST FILMS FOR SUBSCRIBERS.

THE BEST COMPANY MAKES THE BEST FILMS FOR SUBSCRIBERS.

THE BEST COMPANY MAKES THE BEST FILMS FOR SUBSCRIBERS.

THE BEST COMPANY MAKES THE BEST FILMS FOR SUBSCRIBERS.

THE BEST COMPANY MAKES THE BEST FILMS FOR SUBSCRIBERS.

THE BEST COMPANY MAKES THE BEST FILMS FOR SUBSCRIBERS.

THE BEST COMPANY MAKES THE BEST FILMS FOR SUBSCRIBERS.

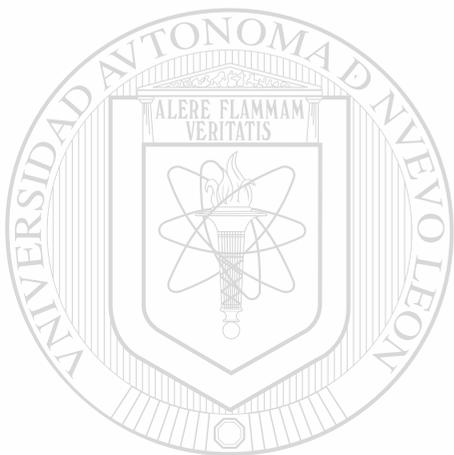
THE BEST COMPANY MAKES THE BEST FILMS FOR SUBSCRIBERS.

THE BEST COMPANY MAKES THE BEST FILMS FOR SUBSCRIBERS.

2003



1020148463



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



RECUBRO DE SENSIBILIDAD A CIERTAS FALLAS  
MULTIPLICATIVAS DE LOS GENERADORES DE  
RESIDUOS BASADOS EN OBSERVADORES

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
POR  
ING. JESUS ENRIQUE PAEZ CASTILLO

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

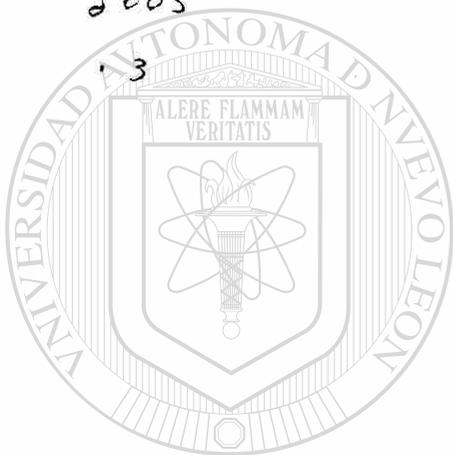
T E S I S

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON  
ESPECIALIDAD EN CONTROL

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L., A ENERO DEL 2008

9 2 25

TH  
ZSS  
.M2  
FM  
2003



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



FONDO  
TESIS

**Universidad Autónoma de Nuevo León**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**  
**División de Estudios de Post-grado**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **“Recobro de sensibilidad a ciertas fallas multiplicativas de los generadores de residuos basados en observadores”** realizada por el alumno Ing. Jesús Enrique Páez Castillo, matrícula 0804787 sea aceptada por su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con Especialidad en Control.



El Comité de Tesis

  
Asesor

Dr. Efraín Alcorta García



Coasesor

Dr. César Elizondo González



Coasesor

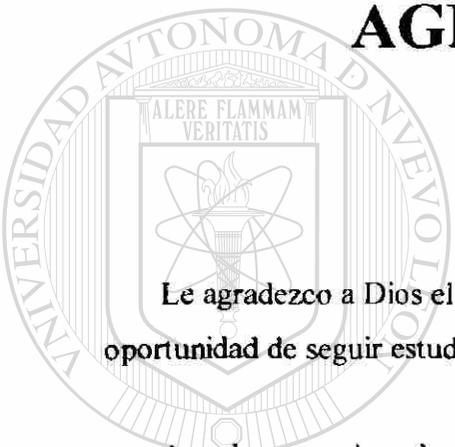
Dr. Ernesto Vázquez Martínez

  
Vo. Bo

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez  
División de Estudios de Post-grado

Cd. Universitaria a Diciembre del 2002

# DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS



Le agradezco a Dios el haberme dado la oportunidad de seguir viviendo, la oportunidad de seguir estudiando y de haberme dado salud a mí y a mis seres queridos.

---

Agradezco a mis padres Eduardo Páez Chávez y María Alicia Castillo de Páez, por su apoyo, por su ayuda incondicional, por estar siempre al pendiente mío, por preocuparse, por sus regaños, por sus enojos, por sus alegrías, por sus consejos, por querer lo mejor para mí, por darme la oportunidad de estudiar, por ser mis padres.

Agradezco a mi hermano José Eduardo Páez Castillo y a mi cuñada Isabel Leal de Páez porque siempre han hecho lo imposible por ayudarme cuando los he necesitado, y porque siempre han tenido un consejo y una opinión para mí. Les agradezco que me pidieran ser el padrino de su hijo Luis Eduardo Páez Leal.

Agradezco a mis tíos, tías, primos y primas por preocuparse por mí.

Agradezco a mis amigos por aguantarme cuando he andado de mal humos, por estar con migo en las buenas y en las malas, por haber tenido una palabra de aliento en los

momentos en que los necesitaba, por su confianza, por sus consejos, por hacerme entender las cosas cuando he estado equivocado, por haber compartido conmigo parte de su vida. Alethya, Erica, Fam. Cuellar Villalobos, Omar, Joachim de Greef, Miguel, Subhankar, Vicente, Wan Feng, Yan Ma.

Y les estaré siempre agradecido a mis maestros, Dr. Efraín Alcorta García y Dr. César Elizondo González por toda su ayuda, su apoyo, sus consejos, sus clases, sus enseñanzas, sus anécdotas, sus tareas, sus exámenes (para llevar), sus regaños, por ser tan buenas personas, por querer que los alumnos se superen.

Agradezco el buen recibimiento y el excelente trato que tuve por parte del Prof. X. Ding y el Prof. Paul M. Frank cuando estuve en la universidad Gerhard Mercator, en Duisburg, Alemania. Les agradezco por sus opiniones y sugerencias a cerca de mi tesis, por su ayuda y su apoyo. También le agradezco al Prof. Gissinger y al Prof. Besset por sus comentarios a cerca de mi trabajo de tesis y por las atenciones que tuvieron conmigo cuando fui a visitar la Ecole Supérieure des Sciences Appliquées pour l'Ingenieur, en Mulhouse, Francia.

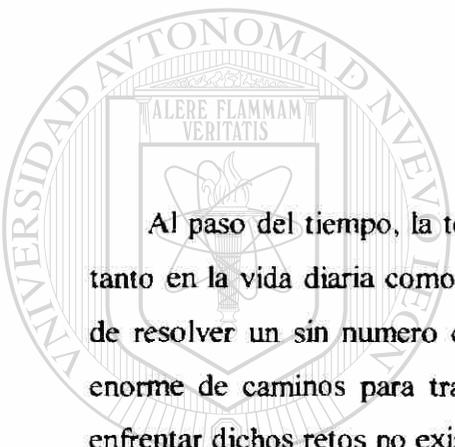
---

Esta tesis esta dedicada a todas las personas mencionadas, ya que el trabajo de investigación realizado y plasmado en esta tesis, esta complementado de muchos recuerdos, anécdotas y consejos de todos ellos.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS  
DIOS LOS BENDIGA A TODOS.

Que la siembra de buenas voluntades te permita cosechar logros que te llenen de prosperidad y alegría.

# PRÓLOGO

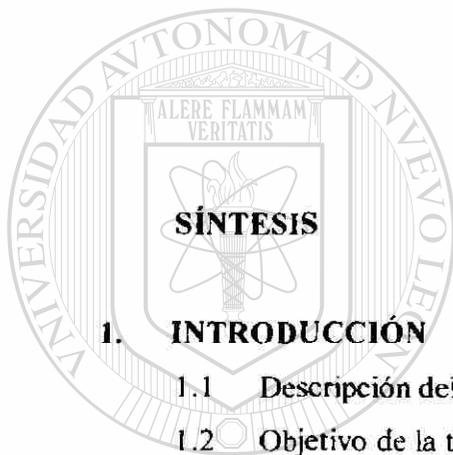


Al paso del tiempo, la tecnología avanza a la par de los problemas que se presentan tanto en la vida diaria como en la industria. El ingeniero tiene ante sí la responsabilidad de resolver un sin número de problemas y a su vez cada problema tiene una cantidad enorme de caminos para tratar de solucionarlo. Frecuentemente las herramientas para enfrentar dichos retos no existen o están obsoletas y es necesario tener los conocimientos apropiados para poder fabricar nuestras propias herramientas. Este trabajo muestra uno de tantos caminos que pueden existir para detectar el mal funcionamiento de un sistema que se este controlando. Este mal funcionamiento puede ser causado por la presencia de fallas en un sistema. Es de importancia que estas fallas se detecten para evitar paros en la producción, accidentes, pérdidas de tiempo que se reflejen en los costos del proceso. El presente estudio es una herramienta de gran utilidad a los ingenieros en control y automatización que les ayudara a mejorar la eficiencia en los procesos industriales.

M.A.M.

J.E.P.C.

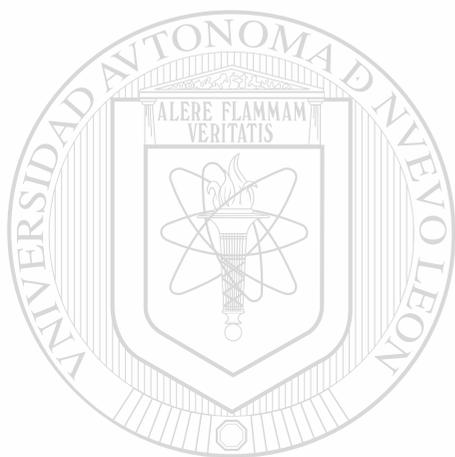
# ÍNDICE



<b>SÍNTESIS</b>	1
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
1.1 Descripción del problema	4
1.2 Objetivo de la tesis	5
1.3 Hipótesis	5
1.4 Límites del estudio de la tesis	6
1.5 Justificación del estudio de tesis	6
1.6 Metodología	7
1.7 Revisión bibliográfica	7
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>9</b>
2.1 Detección de fallas	9
2.2 Observación para FDI	11
2.2.1 Modelo matemático	11
2.2.2 Generador de residuos	12
2.2.3 Aislamiento de fallas	16

2.3	Fallas que no pueden ser detectadas mediante residuos basados en observadores	18
<b>3.</b>	<b>RECOBRO DE LA SENSIBILIDAD</b>	<b>21</b>
3.1	Idea básica	21
3.2	Propuesta de solución	22
3.3	Justificación	24
<b>4.</b>	<b>EVIDENCIA EXPERIMENTAL</b>	<b>25</b>
4.1	Descripción del Equipo	25
4.1.1	Estructura del sistema	25
4.1.2	Hardware	29
4.1.3	Software	30
4.2	Planificación del experimento	31
4.3	Simulación	35
4.4	Resultados	37
<b>5.</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>42</b>
5.1	Discusión	42
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES</b>	<b>44</b>
6.1	Conclusiones	44
6.2	Recomendaciones	45
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>46</b>
	<b>LISTADO DE FIGURAS</b>	<b>49</b>
	<b>LISTADO DE TABLAS</b>	<b>50</b>
	<b>GLOSARIO</b>	<b>51</b>

<b>APÉNDICE A. LINEALIZACIÓN</b>	<b>53</b>
<b>APÉNDICE B. CONTROLABILIDAD Y OBSERVABILIDAD</b>	<b>55</b>
<b>APÉNDICE C. IDENTIDAD DE BENZOUT</b>	<b>57</b>
<b>APÉNDICE D. CÓDIGO FUENTE EN MATLAB</b>	<b>59</b>
<b>RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO</b>	<b>63</b>



# UANL

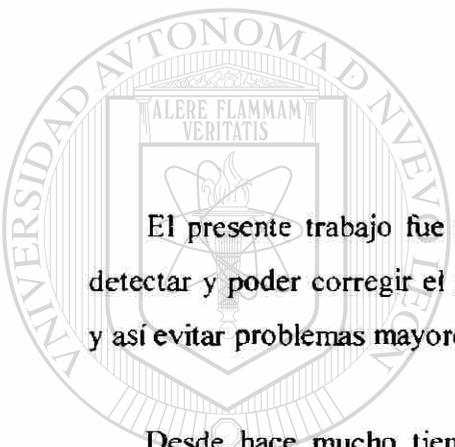
---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

# SÍNTESIS



El presente trabajo fue realizado con el propósito de encontrar una estrategia para detectar y poder corregir el mal funcionamiento de algún sistema lo mas pronto posible y así evitar problemas mayores que podrían terminar en alguna tragedia.

Desde hace mucho tiempo se ha estado investigando en el área de detección de fallas para mejorar los sistemas de control. Una estrategia que se había estado utilizando hasta hace poco tiempo es llamada redundancia física, esta estrategia utiliza duplicidad de elementos físicos (como sensores) para poder tener la seguridad del tipo de falla que esta ocurriendo. La aplicación de este método de detección de fallas es limitado ya que su implementación puede llegar a ser muy costosa, ocupa mucho espacio y es muy pesado tener tantos elementos.

Así se tubo la necesidad de buscar otra estrategia para detectar fallas y se le denominó redundancia analítica, esta utiliza el modelo matemático y las señales de entrada-salida del sistema bajo consideración para determinar si existe algún mal funcionamiento en el sistema, que tipo de falla es y donde esta localizada.

La idea básica de la detección de fallas basada en redundancia analítica consiste en comparar el funcionamiento real (actual) del sistema a través de las mediciones, con el funcionamiento nominal (sin fallas) obtenido mediante un estimador de la salida. El estimador de la salida es obtenido con la ayuda del modelo matemático nominal del sistema y mediciones de la entrada y la salida. Para sistemas lineales, el estimador puede tener la estructura de un observador de Luenberger, con la diferencia que se estima la salida y no el vector de estados.

La señal que solo depende de las fallas se llama residuo. Una posible manera de generar residuos es con la resta de la señal de salida adquirida del sistema (físico ó del modelo matemático) y la señal de salida estimada obtenida del observador. Si el resultado de esta resta es cero (o aproximadamente cero) quiere decir que el sistema esta comportándose igual que la estimación realizada por el observador, en consecuencia no existe alguna falla presente en el sistema. En caso contrario cuando el residuo es diferente de cero significa que alguna falla esta modificando el comportamiento nominal del sistema.

Para fines prácticos es ventajoso trabajar primero con el modelo matemático del sistema en ves de trabajar directamente con el sistema físico ya que de esta manera se disminuyen los riesgos asociados al trabajo con el sistema real.

Las fallas en un sistema pueden ser de varios tipos, pero por su naturaleza estas se presentan como cambios en los parámetros del sistema. Note que al modificarse los parámetros, estas variaciones quedan multiplicadas por los estados y/o por las entradas, echo por el cual reciben el nombre de fallas multiplicativas. En el presente estudio solo se consideraran fallas multiplicativas.

Ya que estudios recientes han demostrado que ciertas fallas multiplicativas no pueden ser detectadas mediante el uso de generadores de residuos basados en observadores, esta investigación presenta una estrategia para poder detectar dichas fallas multiplicativas utilizando generadores de residuos basados en observadores.

La idea considerada para este trabajo es la siguiente, se utiliza una planta piloto de la cual se obtiene su modelo matemático. Después se identifica un grupo de fallas multiplicativas que sean de interés, se diseña un generador de residuos basado en observadores que sea sensible a la primer falla, de esta manera el primer residuo deberá detectar al menos la primer falla. En seguida se selecciona la segunda falla y se diseña un generador de residuos basado en observadores sensible a la segunda falla e insensible a las demás fallas o a la mayor cantidad posible. Y se sigue este procedimiento con el resto de las fallas hasta que todas hayan sido consideradas. Después se construye una tabla donde se represente la sensibilidad de cada residuo.

El conjunto de residuos diseñados de esta manera resulta sensible a todas las fallas multiplicativas de interés. Así con un banco de generadores de residuos basados en observadores se logra el recobro de la sensibilidad de los generadores de residuos a dichas fallas.

Otra idea que se presenta en este trabajo es la de diseñar generadores de residuos insensibles a una sola falla. A diferencia del método anterior este permite, a parte de la detección, la localización de la falla que este ocurriendo.

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Cualquier sistema físico puede ser afectado por fallas. Una forma de detectar estas fallas es observando la salida del sistema y comparándola con la salida nominal (sin fallas) para poder determinar si un cambio no aceptado de parámetros en el sistema está presente. Note que las fallas harán que el sistema no funcione adecuadamente.

Una consecuencia natural de considerar una falla como un cambio en los parámetros es que la falla resultante está multiplicando al estado y/o a la entrada del sistema, en otras palabras, los cambios en los parámetros producen una representación de fallas multiplicativas.

En la literatura de diagnóstico las fallas multiplicativas fueron siempre asociadas a los métodos de diagnóstico basados en identificación (Chen & Patton 1999) y solo recientemente (Alcorta & Frank 1999) fueron utilizadas técnicas basadas en observadores para enfrentar el problema. Una pregunta interesante es que pasa con los generadores de residuos convencionales basados en observadores cuando se quiere

detectar fallas? (Alcorta & Salas 2002) mostraron que si están presentes fallas multiplicativas y están siendo utilizados generadores de residuos basados en observadores, existe un conjunto de fallas que no pueden ser detectadas, en otras palabras el generador de residuos basado en observadores no es sensible a este conjunto de fallas.

El problema consiste en diseñar generadores de residuos basados en observadores que permitan detectar las fallas y localizarlas.

## **1.2 OBJETIVO DE LA TESIS**

El objetivo consiste en desarrollar una estrategia para poder detectar y localizar todas las posibles fallas multiplicativas de interés en un sistema mediante generadores de residuos basados en observadores. Este trabajo toma como base una caracterización matemática del conjunto de fallas que no pueden ser detectadas con el diseño de un dado generador de residuos basado en observadores. Esto es, dado un sistema, un generador de residuos basado en observadores y un conjunto de fallas para las cuales el residuo no es sensible, se pretende construir un banco de generadores de residuos, de ser posible lineales y basados en observadores, que sea sensible a este conjunto de fallas.

## **1.3 HIPÓTESIS**

Dos diseños diferentes de generadores de residuos basados en observadores corresponden a conjuntos diferentes de fallas que no pueden ser detectadas. Así, con dos diseños específicos de generadores de residuos se espera poder detectar las fallas que no

registra uno de los observadores en el otro observador y viceversa y así solucionar el problema.

## 1.4 LÍMITES DEL ESTUDIO DE LA TESIS

El trabajo consistirá en poder recobrar la sensibilidad de el conjunto de fallas que no pueden ser detectadas utilizando generadores de residuos basados en observadores. Además de la justificación teórica, dichas fallas serán causadas concientemente en una planta piloto para verificar los resultados obtenidos. Se consideraran dos fallas, tomando en cuenta que ocurre una falla a la ves, no se presentan al mismo tiempo.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO DE LA TESIS

Es muy importante contar con una estrategia que nos permita corregir el efecto que presentan los generadores de residuos basados en observadores cuando se tienen fallas multiplicativas y así poder mejorar la seguridad y eficiencia del sistema ya que las fallas que no pueden ser detectadas podrían generar problemas tales como pérdidas económicas, pérdida en la calidad de algún producto que se este fabricando y hasta pérdidas humanas.

Este trabajo de investigación lo debe realizar una persona que este en el área de control, y que tenga conocimiento acerca de la detección de fallas en sistemas, así como el conocimiento en el uso de observadores y generadores de residuos.

## 1.6 METODOLOGÍA

A continuación se enlistan los pasos a seguir para lograr el objetivo de la tesis:

1. Revisión de literatura relacionada con el problema sujeto a estudio.
2. Análisis de la información obtenida acerca del problema
3. Planteamiento matemático del problema
4. Establecer una propuesta de solución al problema
5. Desarrollo de la propuesta preliminar
6. Verificación experimental
7. Discusión de resultados
8. Desarrollo de la propuesta definitiva
9. Elaboración de reporte

## 1.7 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Del libro de Jie Chen, y Ron J. Patton, *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*, se obtuvo información acerca de la historia de la investigación de la detección y el aislamiento de las fallas, como fueron los principios de este estudio, cuales fueron los problemas a los que se enfrentaron y como resolvieron estos problemas los investigadores de aquellas épocas hasta los actuales.

La tesis *Modellgetützte Residuengenerierung für die Diagnose von Additiven und Multiplicativen Fehlern in Dynamischen Systemen* del Doctor Efraín Alcorta García, fue de gran ayuda para obtener información acerca de las fallas multiplicativas, su naturaleza y su representación matemática así como otras expresiones matemáticas que fueron necesarias.

La tesis *Frequenzbereichsverfahren zur beobachtergestützten Fehlerentdeckung* del profesor Xianchun Ding, fue de gran apoyo en el aspecto matemático, y de aquí se obtuvieron los principios matemáticos necesarios para el análisis de la detección y el aislamiento de fallas así como también el análisis de la fabricación de los generadores de residuos.

Los artículos fueron de esencial importancia ya que de ellos se obtuvo información referente a cerca de la detección de fallas mediante generadores de residuos basados en observadores, así como los problemas a los que se han enfrentado los investigadores de esta área. También fueron de gran apoyo matemático los teoremas, lemas, definiciones y corolarios presentados en dichos artículos.

El manual del sistema de tres tanques, *Laboratory Equipment for Research and Practical of Control Engineering*, elaborado por AMIRA, fue fundamental para obtener el modelo matemático del sistema que se utilizó para realizar la planificación del experimento así como las pruebas físicas en dicho sistema.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 DETECCIÓN DE FALLAS

Las fallas en un sistema provocan que baje el rendimiento y la calidad del producto terminado, así también disminuye el tiempo de vida de los componentes del sistema. Esto está ligado con pérdidas económicas y en casos extremos hasta pérdidas humanas.

Lo ideal sería que nunca se presentara alguna falla, pero como no se puede estar libre de esto debido a la naturaleza física de los componentes, es de importancia que al momento de presentarse alguna falla se detecte y localice lo mas pronto posible. Así se puede realizar una acción correctiva adecuada para que el sistema de control siga funcionando, este caso es llamado sistema de control tolerante a fallas (Chen & Patton 1999). Donde es importante contar con sistemas tolerantes a fallas es por ejemplo en la industria aérea, o en donde se utilicen hornos de calentamiento, en reactores nucleares, etc.

Al principio, el diagnostico de fallas se realizó mediante redundancia física, consiste en tener una cantidad de elementos mayor a la necesaria, para medir y controlar cierta

variable, esto para poder comparar las mediciones de una misma variable, por ejemplo, se utilizan tres sensores para una misma variable, así los tres sensores deberían de arrojar la misma medición, pero si alguno de estos falla, entonces se hace una comparación entre las mediciones dadas para saber cual de los tres es el que esta fallando. Pero las desventajas encontradas en la redundancia física fueron variadas, era necesario una cantidad excesiva de equipo, se ocupa demasiado espacio y es caro el dar mantenimiento a todo este equipo. Así que se busco otra manera de diagnosticar fallas mediante redundancia analítica. Se utiliza un modelo matemático, el cual estima el comportamiento del proceso físico que se esta monitoreando. La estimación del modelo se lleva a cabo mediante el uso de las señales de entrada y salida el proceso.

A finales de los años 60's y principios de los 70's, con la ayuda de la computación se realizaron algoritmos basados en el procesamiento de señales. Así se propusieron los primeros algoritmos basados en redundancia analítica la cual fue originada en el M.I.T. por R. V. Bread (1971) , y fue llamado Filtro para Detección de Fallas (FDF). después Johnes (1973) retomo el problema y le dio una interpretación geométrica. En esta época se da a conocer el filtro de Kalman para detectar fallas (M.I.T.). En los años siguientes se presenta el Esquema de Observador Dedicado (DOS) basado en un banco de observadores de Luenberger, un observador para cada salida del sistema.

A finales de los 70's y principios de los 80's se propone el espacio de paridad, el cual consiste en determinar ecuaciones del proceso obtenidas de los parámetros del sistema y las señales que pueden ser medidas, así, una falla puede ser detectada cuando no se lleva a cabo alguna de las condiciones presentadas por las ecuaciones.

Al principio de los 80's Isermann (1984) propone que el diagnostico de fallas puede ser logrado utilizando estimación de parámetros inmedibles del proceso y/o las variables de estado. Después se presenta la relación entre espacio de paridad y observadores.

Así también existen otros enfoques para el diagnostico de fallas como métodos basados en lógica difusa, redes neuronales, inteligencia artificial, etc.

## 2.2 OBSERVACIÓN PARA FDI

El diagnóstico de fallas basado en el modelado matemático del sistema, es considerado como detección y aislamiento de fallas ( FDI ), (Chen & Patton 1999).

El primer paso en el diagnóstico de fallas es obtener el modelo matemático del sistema que va a ser monitoreado. Después las fallas son detectadas mediante el uso de un generador de residuos fabricado utilizando observadores. Finalmente se lleva a cabo el aislamiento o localización de las fallas. Este último es para poder etiquetar las fallas, pero no siempre es posible aislarlas completamente.

### 2.2.1 MODELO MATEMÁTICO

El modelo depende de cómo se presente la falla en el sistema. Si la falla esta multiplicando al estado o a la entrada del sistema, esta se denomina falla multiplicativa, si la falla esta sumándose al estado, esta es llamada falla aditiva.

Específicamente las fallas multiplicativas se presentan de manera natural. A diferencia de las multiplicativas, las aditivas se representan en forma artificial.

Para el propósito de este trabajo se utilizara la representación de fallas multiplicativas en un sistema lineal. Si el sistema no fuera lineal, se linealiza con respecto a un punto de operación (ver apéndice A).

Para mostrar la representación de fallas multiplicativas, considere un sistema lineal cuyas matrices son funciones de un vector de parámetros  $\alpha$ .

$$\dot{x} = A(\alpha)x(t) + B(\alpha)u(t) \quad (2.1a)$$

$$y(t) = C(\alpha)x(t) \quad (2.1b)$$

Al presentarse alguna falla, esta producirá un cambio en los parámetros del sistema, entonces lo representaríamos así:

$$\dot{x}(t) = A(\alpha + \Delta\alpha)x(t) + B(\alpha + \Delta\alpha)u(t) \quad (2.2a)$$

$$y(t) = C(\alpha + \Delta\alpha)x(t) \quad (2.2b)$$

donde  $\Delta\alpha$  es el cambio en los parámetros.

### 2.2.2 GENERADOR DE RESIDUOS

El generador de residuos esta formado por la salida del sistema original y la salida del observador del proceso que se esta monitoreando. El observador utiliza las señales de entrada-salida del proceso, para generar la salida estimada del sistema. En la figura 2.1 se muestra el esquema de un generador de residuos utilizando un observador.

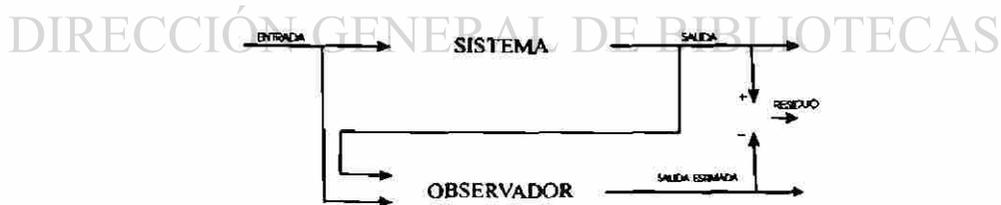


Fig. 2.1. Generador de residuos utilizando un observador

El generador de residuos basado en observadores se obtiene de la siguiente forma:

Considere el sistema representado en espacio de estados definido mediante

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad x(0) = x_0 \quad (2.3a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2.3b)$$

donde  $x \in \mathbb{R}^n$  es el vector de estado,  $u \in \mathbb{R}^p$  el vector de entrada,  $y \in \mathbb{R}^m$  es el vector de las mediciones de salida y  $A$ ,  $B$ ,  $C$  son matrices de dimensiones apropiadas.

En donde la representación del sistema en forma de función de transferencia se obtiene de la siguiente manera:

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B \quad (2.3c)$$

donde  $I$  es una matriz identidad de dimensiones apropiadas

Suponga que el estado  $x$  se estimara mediante el estado  $\hat{x}$  con

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y - \hat{y}) \quad (2.4a)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \quad (2.4b)$$

que representa el observador. En este modelo, se cuenta con  $y$  y  $u$  como entradas al sistema y  $\hat{y}$  como la salida estimada del sistema. El término  $L(y - \hat{y})$  es un término de corrección, mientras que  $L$  funciona como una matriz de ganancia para poder modificar la posición de los polos del observador. Para poder modificar la posición de algún polo del observador, el sistema, o al menos dicho polo, necesita ser observable (ver apéndice B). Entonces

$$\dot{\hat{x}}(t) = (A - LC)\hat{x}(t) + Bu(t) + Ly \quad (2.5)$$

Si se transforma en Laplace (en términos de  $s$ ) resulta

$$\hat{x}(s) = (sI - A + LC)^{-1} (Bu(s) + Ly(s)) \quad (2.6)$$

donde  $I$  es una matriz identidad del tamaño apropiado. Entonces el generador de residuos lo obtendríamos de la siguiente manera:

$$r(s) = y(s) - \hat{y}(s) \quad (2.7)$$

tomando en cuenta (2.3b) y (2.4b), entonces

$$r(s) = y(s) - C(sI - A + LC)^{-1} (Bu(s) + Ly(s)) \quad (2.8)$$

$$r(s) = \tilde{M}(s) y(s) - \hat{N}(s) u(s) \quad (2.9)$$

en donde

$$\tilde{M}(s) = -C(sI - A_L)^{-1} L + I \quad (2.10)$$

$$\hat{N}(s) = C(sI - A_L)^{-1} B \quad (2.11)$$

$$A_L = A - LC \quad (2.12)$$

donde  $\tilde{M}(s)$  y  $\hat{N}(s)$  son la factorización coprima izquierda de  $G(s)$  y satisface

$$\tilde{M}^{-1}(s)\hat{N}(s) = G(s) \quad (2.13)$$

Así también

$$N(s)M^{-1}(s) = G(s) \quad (2.14)$$

donde

$$M(s) = K(sI - A_\lambda)^{-1} B + I \quad (2.15)$$

$$N(s) = C(sI - A_K)^{-1} B \quad (2.16)$$

$$A_K = A + BK \quad (2.17)$$

donde  $M(s)$  y  $N(s)$  son la factorización coprima derecha de  $G(s)$  y  $K$  es una matriz de ganancia que se utiliza para poder modificar la posición de los polos del sistema. Para poder modificar la posición de algún polo del sistema, el sistema, o al menos dicho polo, necesita ser controlable (ver apéndice B).

Para la doble factorización coprima existen las funciones de transferencia

$$Y(s) = -K(sI - A_L)^{-1} B + I \quad (2.18)$$

$$X(s) = -K(sI - A_L)^{-1} L \quad (2.19)$$

$$\hat{Y}(s) = C(sI - A_K)^{-1} L + I \quad (2.20)$$

$$\hat{X}(s) = -K(sI - A_K)^{-1} L \quad (2.21)$$

$\in RH_\infty$  (matrices racionales, estables y propias) que satisfacen la identidad de Bezout (ver apéndice C).

Un generador de residuos generalizado para el sistema (2.3) es presentado (Frank and Ding 1994) como sigue:

$$r(s) = F(s) y(s) + H_q(s) u(s) \quad (2.22)$$

donde  $F(s) \in RH_\infty$ ,  $H_q(s) = H(s) + H$ ,  $H(s) \in RH_\infty$  y el rango de  $H$  es igual a  $m$  ( $\text{rank}(H) = m$ ) y

$$F(s) = HN(s)Y(s) - Q(s)\hat{N}(s) \quad (2.23)$$

$$H(s) = HN(s)X(s) + Q(s)\hat{M}(s) \quad (2.24)$$

donde  $Q(s) \in RH_{\infty}$  y puede ser seleccionada arbitrariamente. Esta parametrización del generador de residuos puede ser representada por:

$$r(s) = R(s)[\hat{M}(s) y(s) - \hat{N}(s) u(s)] \quad (2.25)$$

donde se definió que

$$R(s) = Q(s) - H\hat{Y}(s) \quad (2.26)$$

$$R(s) \in RH_{\infty}$$

El funcionamiento físico de  $R(s)$  es el de trabajar como un post-filtro como se muestra en la figura (2.2). Este filtro provee ciertas características al generador de residuos, por ejemplo en la detección de fallas o generación de residuos robusta.

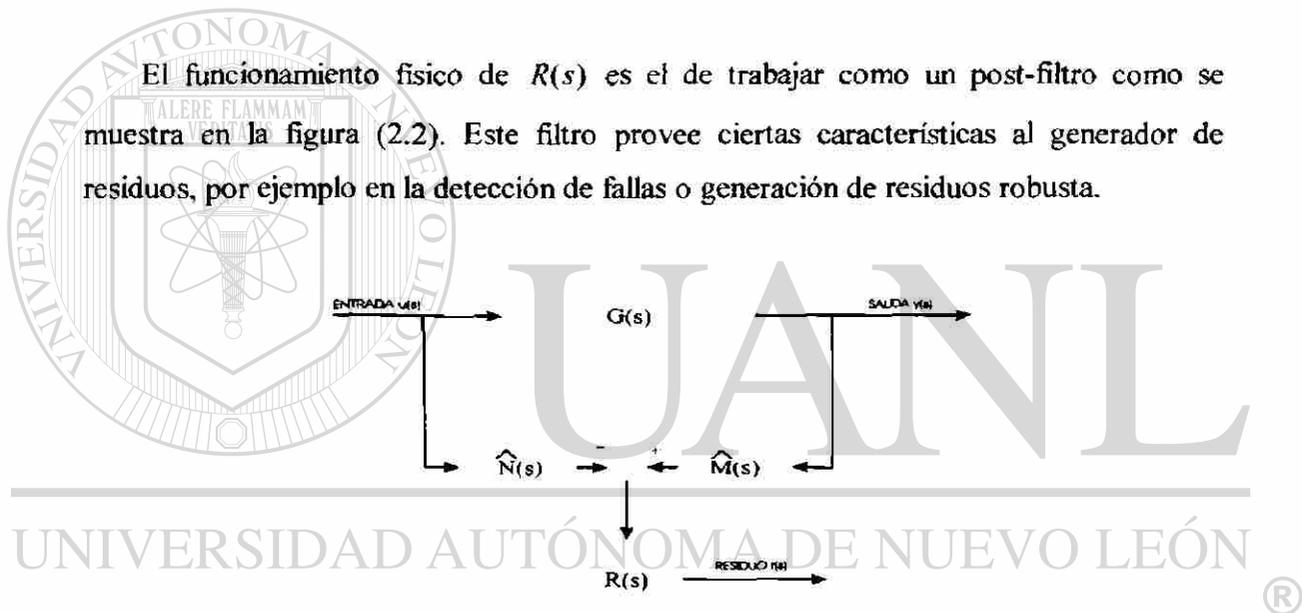


Fig. 2.2. Generador de residuos utilizando post-filtro

### 2.2.3 AISLAMIENTO DE FALLAS

Cuando una falla fue detectada es de interés conocer el tiempo en el que ocurrió la falla y en donde se presentó.

Para aislar una falla de otra se utiliza un grupo de observadores o esquema observador (P. M. Frank, 1990). Para simplificar la explicación consideraremos que han ocurrido  $m$  fallas diferentes  $f_i (i = 1, \dots, m)$  en el sistema. La estructura general del esquema observador, no importa si es usado para la detección de fallas en instrumentos, en componentes o en sensores, se muestra en la figura 2.3.

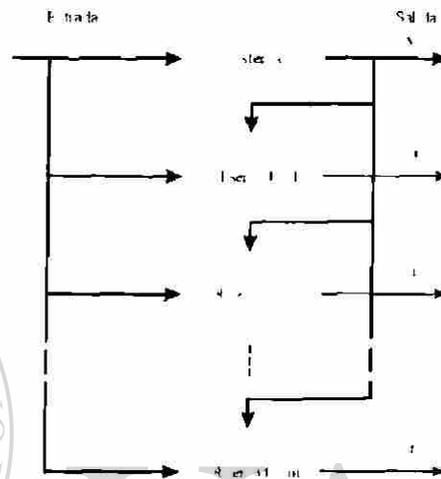


Fig. 2.3. Estructura general del esquema observador

donde

$$\begin{aligned} r_1 &= q_1(f_2, f_3, \dots, f_m) \\ r_2 &= q_2(f_1, f_3, \dots, f_m) \\ &\vdots \\ r_m &= q_m(f_1, f_2, \dots, f_{m-1}) \end{aligned} \quad (2.27)$$

La función de decisión para la evaluación lógica de los residuos podría ser como sigue:

Si  $r_2, r_3, \dots, r_m$  son diferentes de cero y  $r_1$  es igual a cero, ocurrió la primera falla

Si  $r_1, r_3, \dots, r_m$  son diferentes de cero y  $r_2$  es igual a cero, ocurrió la segunda falla

Y así con los demás.

## 2.3 FALLAS QUE NO PUEDEN SER DETECTADAS MEDIANTE RESIDUOS BASADOS EN OBSERVADORES

El uso de observadores para generar residuos y detectar fallas ha sido asociado frecuentemente a fallas aditivas. Sin embargo, debido a la naturaleza multiplicativa de las fallas, los residuos basados en observadores también deben ser útiles para este tipo de fallas. Si las fallas multiplicativas están presentes y son utilizados residuos basados en observadores, hay un conjunto de estas fallas que no podrían ser detectadas (Alcorta & Salas, 2002).

**Definición 1.** Una falla  $\alpha$ , (aditiva o multiplicativa) se le llama detectable en el sistema (2.3) si el efecto de la falla  $\alpha$ , produce cambios en la salida del sistema.

De hecho, una falla es detectable por un residuo específico solo si esa falla produce cambios en ese residuo.

La sensibilidad de los residuos basados en observadores lineales (enfoque de factorización) a fallas multiplicativas se ha cuestionado por Alcorta-García y Salas-Armendáriz (2002). El resultado principal está sobreescrito aquí: Considerar el residuo dado por (2.22) y suponer que una falla multiplicativa, representada por  $\Delta\theta$ , está presente en el sistema. Esto quiere decir que las matrices  $A$ ,  $B$  y  $C$  del sistema ya no coincidirán con las nominales. Asumir que una falla  $\Delta\theta$ , modifica las matrices nominales del sistema y las representaremos como  $A_i$ ,  $B_i$  y  $C_i$ , entonces:

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \quad x(0) = x_0 \quad (2.28)$$

$$y(t) = C_i x(t) \quad (2.28)$$

y

$$G_i(s) = C_i(sI - A_i)^{-1} B_i \quad (2.29a)$$

$$G_i(s) = N_i(s)M_i^{-1}(s) \quad (2.29b)$$

$$G_i(s) = \hat{M}_i^{-1}(s)\hat{N}_i(s) \quad (2.29c)$$

De la misma manera, el sistema nominal podría escribirse de la siguiente manera:

$$G_0(s) = C_0(sI - A_0)^{-1} B_0 \quad (2.30a)$$

$$G_0(s) = N_0(s)M_0^{-1}(s) \quad (2.30b)$$

$$G_0(s) = \hat{M}_0^{-1}(s)\hat{N}_0(s) \quad (2.30c)$$

Considere un generador de residuos de la forma (2.25), diseñado basándose en el sistema nominal (como es usual), donde

$$R(s) = Q(s) - H\hat{Y}_0(s) \quad (2.31)$$

*Teorema 1. Dado un generador de residuos, este es insensible a la falla multiplicativa  $\Delta\theta$ , si y solo si la ecuación*

$$P_0(s)A(s) + Q(s)B(s) = P_i(s) \quad (2.32)$$

*se mantiene, en donde*

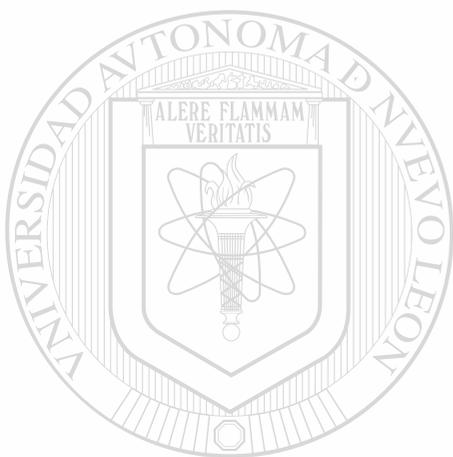
$$A(s) = Y_0(s)M_i(s) + X_0(s)N_i(s) \quad (2.33)$$

$$B(s) = -\hat{N}_0(s)M_i(s) + \hat{M}_0(s)N_i(s) \quad (2.34)$$

$$P_0(s) = HC_0(sI - A_0)^{-1} B_0 \quad (2.35)$$

$$P_i(s) = HC_i(sI - A_i)^{-1} B_i \quad (2.36)$$

Cabe mencionar que el valor de  $H$  se escoge a conveniencia ya que es un factor que multiplica a la salida y del sistema (2.3). En esta investigación se consideró un valor de  $H$  unitario.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 3. RECOBRO DE SENSIBILIDAD

### 3.1 IDEA BÁSICA

Debido al problema de la falta de detectabilidad mencionado anteriormente, en este trabajo se propone un enfoque (lineal y basado en observadores) para obtener un conjunto de residuos que recobren la sensibilidad con respecto a todas las fallas posibles.

El enfoque multi-residuos propuesto, toma en cuenta la sensibilidad de los residuos con respecto a las fallas. La multiplicidad de residuos así como el diseño especial nos permite estar seguros de detectar fallas multiplicativas aun si se utilizaron observadores lineales.

La recuperación de la sensibilidad de los residuos basados en observadores para fallas multiplicativas está basada en un razonamiento muy simple: Un diseño específico de un generador de residuos es insensible a un conjunto específico de fallas multiplicativas. Diferentes diseños de residuos son insensibles a diferentes conjuntos de fallas.

### 3.2 PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Para tener un conjunto de residuos (combinados) con sensibilidad hacia todas las fallas posibles es necesario considerar un banco de generadores de residuos. Cada residuo debe ser diseñado de manera que cada conjunto de fallas insensibles correspondientes a cada residuo, no coincidan. No se cuenta con una manera sistemática para diseñar tales residuos. Una idea propuesta en este trabajo es la siguiente:

- Identificar un primer grupo de fallas multiplicativas que sean de interés
- Diseñar un generador de residuos basado en observadores que no satisfaga la condición (2.32) para la primera falla, este residuo debería detectar al menos la primer falla.
- Seleccionar una segunda falla
- Diseñar un generador de residuos basado en observadores sensible a la segunda falla, la ecuación (2.32), con los términos adecuados correspondientes a la segunda falla, no debe satisfacerse.
- Seguir este procedimiento con el resto de las fallas hasta que todas hallan sido consideradas.

El conjunto de residuos diseñados de esta manera resulta sensible a todas las fallas multiplicativas de interés. La sensibilidad de un residuo a otra falla multiplicativa, para la cual no a sido diseñado, también podría ser posible.

Pero de esta manera simplemente se asegura la sensibilidad de los residuos a las fallas consideradas. Sería difícil identificar la falla que está ocurriendo ya que es muy común que el generador de residuos diseñado con la propuesta anterior, para ser sensible a cierta falla, sea sensible a un grupo muy grande de fallas, en la mayoría de los casos este generador de residuos es sensible a todas las fallas que se consideraron de interés. Esto, por un lado, es bueno ya que se prueba que no existiría insensibilidad del generador de residuos a las fallas consideradas. y mejor aún, solo se utilizaría un

generador de residuos. Pero, por otro lado, no sería posible identificar la falla que esta ocurriendo. Dándole otro enfoque y otra utilidad a la condición de insensibilidad (Teorema 1) se podría lograr, además del recobro de la sensibilidad, el aislamiento de las fallas. Esto es, será posible detectar y localizar las fallas que se consideren de interés. La metodología propuesta es la siguiente:

- Identificar un primer grupo de fallas multiplicativas que sean de interés
- Diseñar un generador de residuos basado en observadores que satisfaga la condición (2.32) para la primera falla, este residuo será insensible a la primer falla y sensible a las demás fallas consideradas (esto sería lo ideal, podría presentarse el caso en que este residuo sea insensible a varias de las fallas en consideración, pero no sería de utilidad si fuera insensible a todas las fallas consideradas).
- Seleccionar una segunda falla
- Diseñar un generador de residuos basado en observadores insensible a la segunda falla, la ecuación (2.32), con los términos adecuados correspondientes a la segunda falla, debe satisfacerse. Este residuo será insensible a la segunda falla y sensible a las demás fallas consideradas (también podría presentarse el caso en que este residuo sea insensible a varias de las fallas en consideración, pero no sería de utilidad si fuera insensible a todas las fallas consideradas o insensible a las mismas fallas que otro generador de residuos).
- Podría ser de utilidad y facilidad que uno de los generadores de residuos fuera sensible a todas las fallas consideradas. Para lograr esto podría apoyarse en la primer propuesta mencionada en este tema.
- Seguir este procedimiento con el resto de las fallas hasta que todas hallan sido consideradas.
- Se construye una tabla donde se represente la sensibilidad de los residuos a las fallas consideradas.
- Se realiza una evaluación lógica utilizando las señales de los residuos para saber que falla esta ocurriendo o que fallas podrían estar ocurriendo.

De esta manera, el banco de residuos sería sensible a todas las fallas de interés y se podrían localizar todas las fallas siempre y cuando el sistema y el tipo de fallas consideradas lo permitan.

### 3.3 JUSTIFICACIÓN

La justificación teórica se puede hacer formalmente mediante el uso de representación de los residuos en términos de factorizaciones coprimas y verificación de las condiciones de insensibilidad a la falla junto a una lógica que evalúe los residuos.

Realmente, la solución propuesta en el punto 3.2 es un primer intento por resolver la problemática descrita referente a la falta de detectabilidad de fallas de los métodos de diagnóstico de fallas en observadores. Sin embargo, a pesar de no ser un método del todo óptimo en cuanto al número de residuos empleados, satisface la detectabilidad de las fallas analizadas.

---

Con el método propuesto solo puede asegurarse la detectabilidad y aislamiento de fallas que estén modeladas, lo cual es un resultado bastante sensato. Fallas que no estén modeladas pueden afectar al sistema y podrían, eventualmente, no ser detectadas. Esto último es una motivación para seguir trabajando en el tema.

## 4. EVIDENCIA EXPERIMENTAL

### 4.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

A continuación se presenta la descripción del sistema que será utilizado, así como la descripción de el hardware y el software que serán necesarios para llevar a cabo los experimentos.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

#### 4.1.1 ESTRUCTURA DEL SISTEMA

El sistema de dos tanques (ver figura 4.1) consiste de dos tanques cilíndricos (tanque 1 y tanque 2) con el mismo diámetro, los cuales están conectados por un conducto. El tanque uno puede ser llenado mediante una bomba, el flujo de salida nominal esta localizado en la parte inferior de el tanque 2.

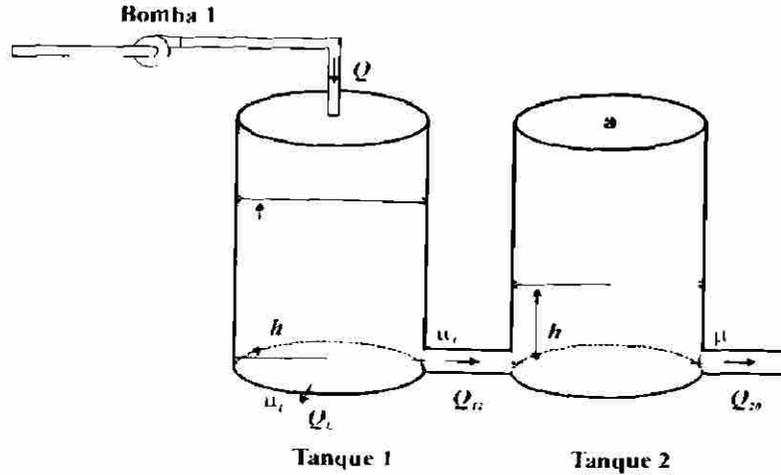


Fig. 4.1. Sistema de tanques

**Ecuaciones matemáticas**

Entradas

$$0 \leq Q_1 \leq Q_{\max}$$

Cambio de flujo suministrado por la bomba

$$Q_{1\max} = 100 \frac{ml}{sec}$$

Cambio de flujo máximo suministrado

Variables de estado

$$0 \leq h_1, h_2 \leq h_{\max}$$

$$h_{\max} = 0.6 \text{ m}$$

Nivel de agua

Salida

$$h_1 - h_2$$

Diferencia entre niveles medidos

**Ecuaciones de balance de los tanques**

$$Q_1 - Q_{12} - Q_L = a \times \frac{dh_1}{dt} \tag{4.1}$$

$$Q_{12} - Q_{20} = a \times \frac{dh_2}{dt} \tag{4.2}$$

$$a = 0.0154 \text{ m}^2$$

Área transversal de los tanques

$$Q_{12u} = \mu_1 \times S_n \times \text{sign}(h_1 - h_2) \times \sqrt{2 \times g \times h_1 - h_2}$$

Cambio de flujo nominal del tanque 1 al 2

$$Q_{20} = \mu_2 \times S_L \times \sqrt{2 \times g \times h_2}$$

Cambio de flujo en la salida

$$Q_{12} = (1 - FB) \times Q_{12u}$$

Cambio de flujo efectivo del tanque 1 al 2

$$Q_L = F_L \times \mu_L \times S_L \times \sqrt{2 \times g \times h_1}$$

Cambio del flujo de salida de las fugas

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$S_n = 5 \times 10^{-5} m^2$$

$$S_L = 8 \times 10^{-5} m^2$$

$$\mu_1 = 0.5$$

$$\mu_2 = 0.7$$

$$\mu_L = 0.7$$

$$FB = 0 \dots 1$$

$$FL = 0 \dots 1$$

$$FA = 1 \dots 0$$

$$FS = 1 \dots 0$$

Valor de la gravedad en la tierra

Área transversal de los conductos

Área transversal de las fugas

Coefficiente de flujo de salida del tanque 1

Coefficiente de flujo de salida del tanque 2

Coefficiente de flujo de salida de las fugas

Magnitud de obstrucción entre tanques 1 y 2

Magnitud de fuga en el tanque 1

Magnitud de la falla en el actuador

Magnitud de falla en los sensores de nivel

De las ecuaciones 4.1 y 4.2 se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = f(h_1, h_2, Q_1) \quad (4.3)$$

### Linealización

Ya que el sistema no es lineal, entonces utilizaremos un punto de operación para linealizarlo.

Puntos de operación:

$$h_0 = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.0830896 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$Q_0 = [7.15 \times 10^{-5}] \quad (4.5)$$

Entonces las matrices  $A$  y  $B$  del sistema linealizado

$$\Delta \dot{h}(t) = A \Delta h(t) + FA B \Delta Q(t) \quad (4.6a)$$

$$\Delta y(t) = FS C \Delta h(t) \quad (4.6b)$$

donde

$$\Delta h = h - h_0 \quad (4.7)$$

$$\Delta Q = Q - Q_0 \quad (4.8)$$

se pueden definir de la siguiente manera

$$A := \frac{\partial f}{\partial h} \quad (4.9)$$

$$B := \frac{\partial f}{\partial Q} \quad (4.10)$$

$$C = [1 \quad FFB \quad -1] \quad (4.11)$$

donde  $\partial$  representa la derivada parcial. Entonces:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (4.12a)$$

donde

$$A_{11} \approx (1 - FB)(-5.56823 \times 10^{-3}) - FL(0.011389425) \quad (4.12b)$$

$$A_{12} \approx (1 - FB)(5.56823 \times 10^{-3}) \quad (4.12c)$$

$$A_{21} \approx (1 - FB)(5.56823 \times 10^{-3}) \quad (4.12d)$$

$$A_{22} \approx (1 - FB)(-5.56823 \times 10^{-3}) - 0.027939168 \quad (4.12e)$$

y

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \end{bmatrix} \quad (4.13a)$$

donde

$$B_{11} = \frac{1}{0.0154} \quad (4.13b)$$

$$B_{21} = 0 \quad (4.13c)$$

Note que en este sistema están presentes fallas multiplicativas

### 4.1.2 HARDWARE

Se utiliza una tarjeta de adquisición de datos DAC98 con las siguientes características:

- Ocho entradas analógicas
- Un convertidor Analógico/Digital de 12 Bit
- Dos salidas análogas bipolar/unipolar
- Dos convertidores Digital/Analógico de 12 Bit
- Tres entradas de encoder
- Contador de 16 bit para incrementar las señales del encoder
- Ocho entradas digitales
- Ocho salidas digitales
- Cronometro/contador de 32 bit para control de interrupción o medición de tiempo
- Cronometro contador de 16 bit para control de interrupción o medición de tiempo

Esta tarjeta esta instalada en una computadora IBM con las siguientes características:

- Procesador 100 MGz
- Memoria ram de 16 M
- Disco duro de 1GB
- Monitor de 14 pulgadas
- Windows 95 como sistema operativo

La tarjeta se conecta al actuador del sistema por medio de un cable blindado. Y a la computadora por medio de un cable de 50 pines.

El actuador consta de un interruptor de encendido y apagado, cuenta con un fusible de 1.6 Amperes de seguridad para su alimentación principal de 230 volts. En la parte frontal cuenta con los controles para el servomotor así como los switches para seleccionar la forma de operación de los mismos (en manual o en automático). En otra sección del actuador se encuentran las señales de las medición de los sensores de nivel y de los servomotores.

También se utiliza una caja adaptadora que sirve para operar las válvulas de control eléctrico. Esta es conectada directamente a las válvulas.

Para trabajar con las simulaciones y para realizar procesos matemáticos se utiliza una computadora Alaska de 40 GB de disco duro, procesador pentium III de 933 MHz, 128 M en memoria ram y cuenta con Windows 98 como sistema operativo

### 4.1.3 SOFTWARE

El sistema será controlado por medio de una computadora la cual tiene instalado el software necesario para dicha tarea:

- Windows 95 como sistema operativo para la computadora utilizada para controlar el sistema de tres tanques.
- Software AMIRA
- Windows 98 como sistema operativo de la computadora utilizada para simulaciones y procesos matemáticos.
- Mat Lab
- Simulink

## 4.2 PLANIFICACIÓN DEL EXPERIMENTO

Se llevara a cabo la experimentación utilizando una planta piloto fabricada por la compañía alemana AMIRA.

Se tomarán en consideración dos fallas multiplicativas de interés, una en el actuador (FA), la cual afecta la entrada al sistema y otra en los sensores (FS), esta afecta en la medición de los estados. Se consideran estas dos fallas y no fugas (FL) u obstrucciones (FB) porque se puede observar mejor el efecto de insensibilidad y se percibe mejor la detección y el aislamiento. Se obtendrán los modelos matemáticos del sistema nominal y de los sistemas afectados por las fallas tomando en cuenta las ecuaciones 4.6 - 4.9. Al sistema nominal, sin fallas lo llamaremos sistema 0 y se comprobará que se tiene el mismo comportamiento, el sistema real y la simulación del sistema utilizando el modelo matemático.

Sistema 0:

$$\Delta \dot{h} = \begin{bmatrix} -5.56823 \times 10^{-3} & 5.56823 \times 10^{-3} \\ 5.56823 \times 10^{-3} & -0.03350739 \end{bmatrix} \Delta h + \begin{bmatrix} 64.93506493506 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta Q \quad (4.14)$$

$$\Delta y = [1 \quad -1] \Delta h$$

Se define la primer falla a considerar que es una falla del 70 % en los sensores ( $FS = 0.3$ ) y se obtiene el modelo matemático tomando en cuenta dicha falla, lo llamaremos sistema 1.

Sistema 1:

$$\Delta \dot{h} = \begin{bmatrix} -5.56823 \times 10^{-3} & 5.56823 \times 10^{-3} \\ 5.56823 \times 10^{-3} & -0.03350739 \end{bmatrix} \Delta h + \begin{bmatrix} 64.93506493506 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta Q \quad (4.15)$$

$$\Delta y = [0.3 \quad -0.3] \Delta h$$

Se define la segunda falla a considerar que es una falla del 70 % en el actuador ( $FA = 0.3$ ) y se obtiene el modelo matemático tomando en cuenta dicha falla, lo llamaremos sistema 2.

Sistema 2:

$$\Delta \dot{h} = \begin{bmatrix} -5.56823 \times 10^{-3} & 5.56823 \times 10^{-3} \\ 5.56823 \times 10^{-3} & -0.03350739 \end{bmatrix} \Delta h + \begin{bmatrix} 19.48051948052 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta Q \quad (4.16)$$

$$\Delta y = [1 \quad -1] \Delta h$$

En seguida se construyen los generadores de residuos. Cabe mencionar que los tres sistemas son controlables y observables, de lo contrario no se podría trabajar con ellos. El primer generador de residuos de la forma (2.25) se puede diseñar de tal manera que sea insensible a la primer falla, cumpliendo con la condición (2.32). Aquí optaremos por diseñar este primer generador de residuos sensible a ambas fallas. esto puede lograrse utilizando un post-filtro unitario.

$$r_1(s) = \hat{M}_0(s) y(s) - \hat{N}_0(s) u(s) \quad (4.17)$$

donde

$$\hat{M}_0(s) = \frac{s^2 + 0.03908s + 0.0001556}{s^2 + 5.5s + 7.553} \quad (4.18)$$

$$\hat{N}_0(s) = \frac{64.94s + 1.814}{s^2 + 5.5s + 7.553} \quad (4.19)$$

(Los polos del observador se colocaron en  $-2.65$  y  $-2.85$ )

El segundo generador de residuos de la forma (2.25) se diseña de tal manera que sea insensible a la segunda falla, cumpliendo con la condición (2.32).

$$r_2(s) = R(s)[\hat{M}_0(s) y(s) - \hat{N}_0(s) u(s)] \quad (4.20)$$

A diferencia del primer generador de residuos, aquí se tiene que diseñar el post-filtro de la forma (2.31), que haga al segundo generador de residuo insensible a la segunda falla.

Para obtener  $Q(s)$ , despejando de la ecuación (2.32), se debe calcular lo siguiente:

**Factorizaciones coprimas del sistema nominal (sistema 0)**

$$\hat{M}_0(s) = \frac{s^2 + 0.03908s + 0.0001556}{s^2 + 5.5s + 7.553} \quad (4.21)$$

$$\hat{N}_0(s) = \frac{64.94s + 1.814}{s^2 + 5.5s + 7.553} \quad (4.22)$$

$$N_0(s) = \frac{64.94s + 1.814}{s^2 + 2.65s + 1.775} \quad (4.23)$$

$$X_0(s) = \frac{1232s + 14.17}{s^2 + 5.5s + 7.553} \quad (4.24)$$

$$Y_0(s) = \frac{s^2 + 8.111s - 7.999 \times 10^4}{s^2 + 5.5s + 7.553} \quad (4.25)$$

$$\hat{Y}_0(s) = \frac{s^2 + 8.111s - 7.999 \times 10^4}{s^2 + 2.65s + 1.775} \quad (4.26)$$

**Factorizaciones coprimas del sistema con falla en el actuador (sistema 2)**

$$M_2(s) = \frac{s^2 + 0.03908s + 0.0001556}{s^2 + 0.33s + 0.0272} \quad (4.27)$$

$$N_2(s) = \frac{19.48s + 0.5443}{s^2 + 0.33s + 0.0272} \quad (4.28)$$

**Cálculos de  $A(s)$ ,  $B(s)$ ,  $P_0(s)$ ,  $P_2(s)$ , (2.33 - 2.36) usando  $H = 1$  por simplicidad.**

$$A(s) = \frac{s^4 + 8.15s^3 - 5.599 \times 10^4 s^2 - 2179s - 4.735}{s^4 + 5.83s^3 + 9.395s^2 + 2.642s + 0.2054} \quad (4.29)$$

$$B(s) = \frac{-45.45s^3 - 3.046s^2 - 0.0567s - 0.0001976}{s^4 + 5.83s^3 + 9.395s^2 + 2.642s + 0.2054} \quad (4.30)$$

$$P_0(s) = \frac{64.94s + 1.814}{s^2 + 2.65s + 1.755} \quad (4.31)$$

$$P_2(s) = \frac{19.48s + 0.5443}{s^2 + 0.33s + 0.0272} \quad (4.32)$$

Entonces

$$Q(s) = \frac{s^2 + 8.111s - 7.999 \times 10^4}{s^2 + 2.65s + 1.755} \quad (4.33)$$

Así, el post-filtro

$$R(s) = \frac{4.903 \times 10^{-13} s^3 + 1.31 \times 10^{-10} s^2 - 2.474 \times 10^{-9} s - 2.416 \times 10^{-9}}{s^4 + 5.3s^3 + 10.53s^2 + 9.301s + 3.08} \quad (4.34)$$

Las operaciones para calcular los generador de residuos, fueron obtenidas utilizando el software MatLab (El código fuente del programa se muestra en el apéndice D). Para graficar las respuestas de los residuos se utilizo el programa Simulink.

Cabe mencionar que aunque sería demasiado difícil, no se puede descartar la posibilidad de que para alguna falla en un sistema dado se tenga la mala fortuna de seleccionar un valor de  $Q(s)$  con el cual el generador de residuos no detecte la falla.

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
**4.3 SIMULACIÓN**  
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Se utiliza el programa de MatLab y Simulink para trabajar con las simulaciones del sistema y la generación de fallas en el mismo (ver figura 4.2.).

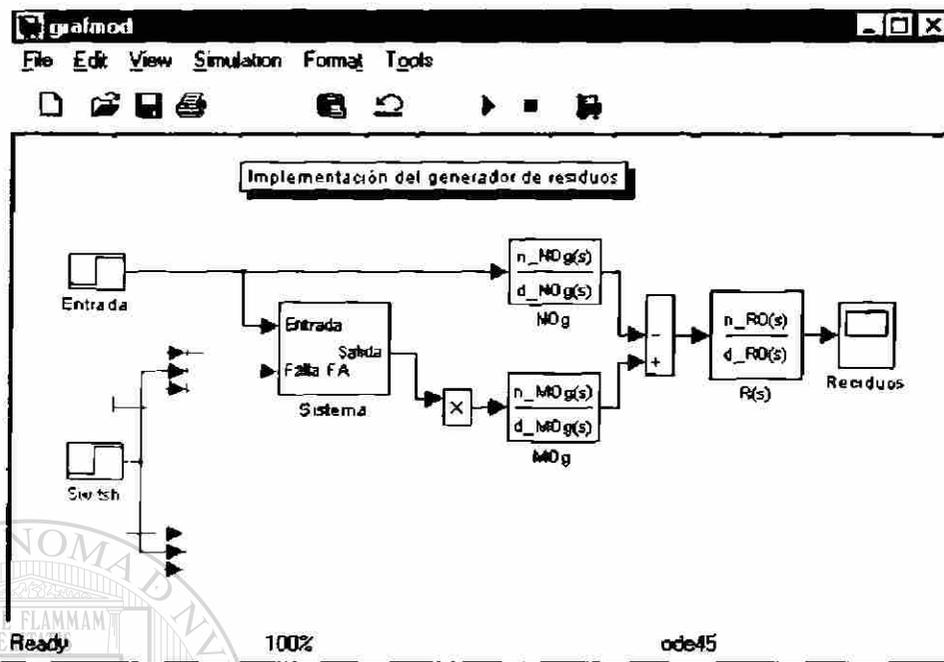


Fig. 4.2. Implementación del generador de residuos en Simulink

El cuadro de “Switch” permite cambiar de un sistema a otro en un tiempo de 1500 segundos. Los sistemas con los que trabajará dependen de los valores que tenga en los cuadros de “FS” y “FA”. La implementación que se muestra en la figura 4.2 es la de el sistema nominal (sistema 0). El cambio del sistema 0 al sistema 1 sería implementado al modificar el valor superior del cuadro “FS” por 0.3 (los demás valores de FS y FA en 1) y el cambio del sistema 0 al sistema 2 sería implementado al modificar el valor superior del cuadro “FA” por 0.3 (los demás valores de FS y FA en 1).

El cuadro “Sistema” representa al modelo matemático del sistema. En la figura 4.3 puede observar como esta compuesto.

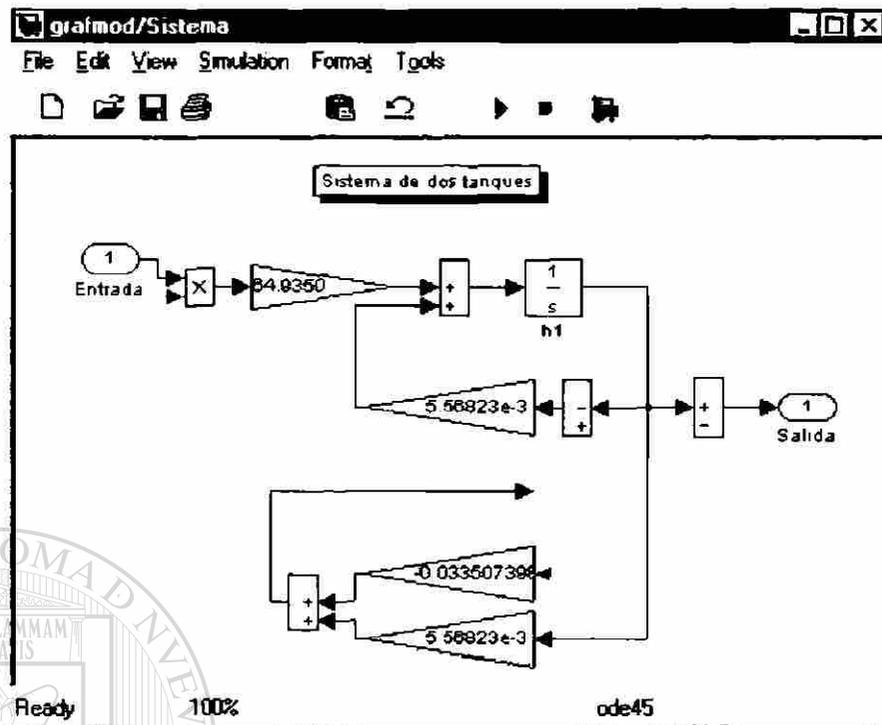


Fig. 4.3. Implementación del modelo matemático del sistema de dos tanques

#### 4.4 RESULTADOS

En seguida se presentan los resultados gráficos obtenidos de la salida del sistema y los residuos en cada caso, con condiciones nominales ( $FS=1$  y  $FA=1$ ), cuando esta presente la falla en los sensores ( $FS=0.3$ ) y cuando esta presente la falla en el actuador ( $FA=0.3$ ).

**Graficas en condiciones nominales.**

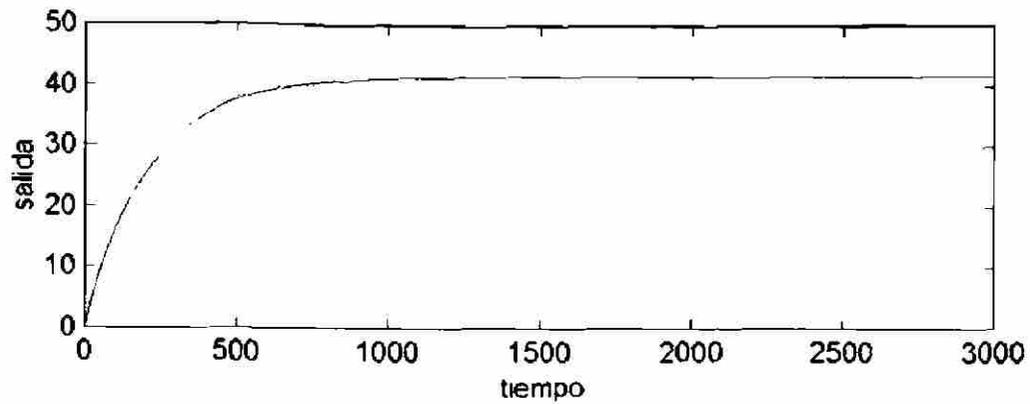


Fig. 4.4. Salida del sistema en condiciones nominales

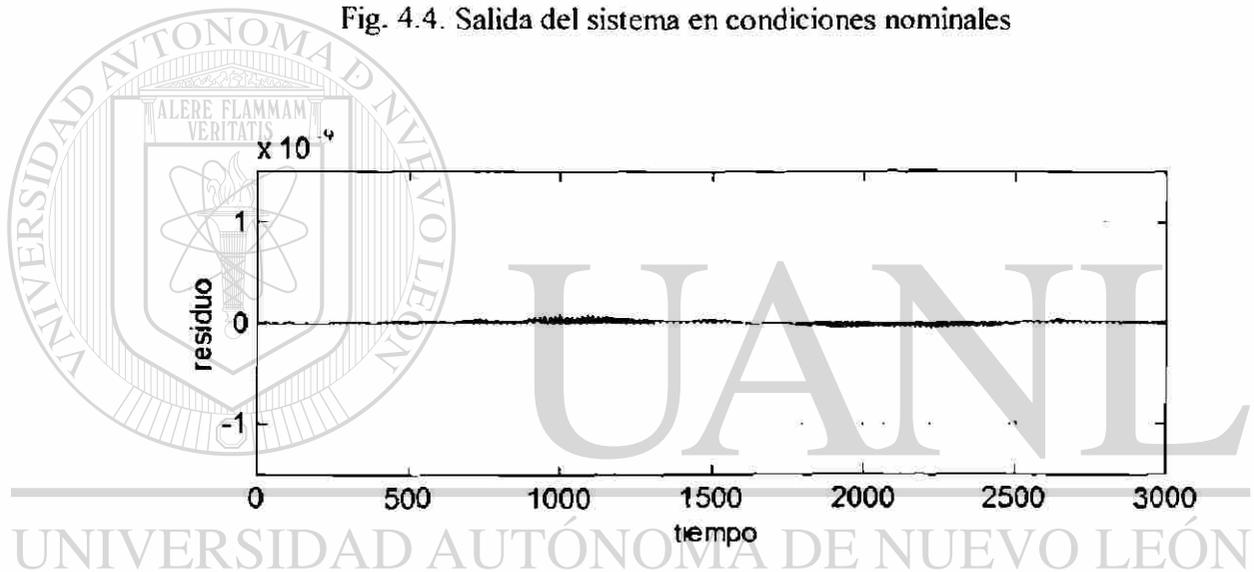


Fig. 4.5. Residuo 1 en condiciones nominales

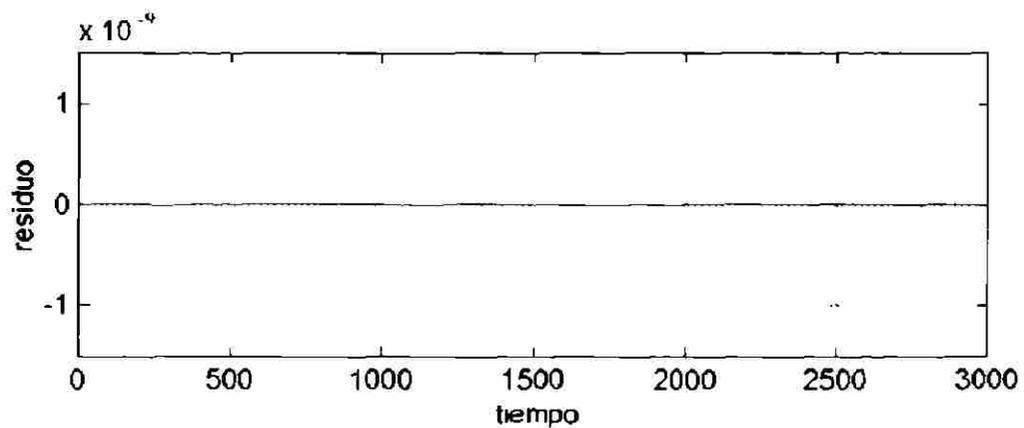


Fig. 4.6. Residuo 2 en condiciones nominales

Graficas al presentarse la falla en los sensores (FS=0.3) al tiempo de 1500 segundos.

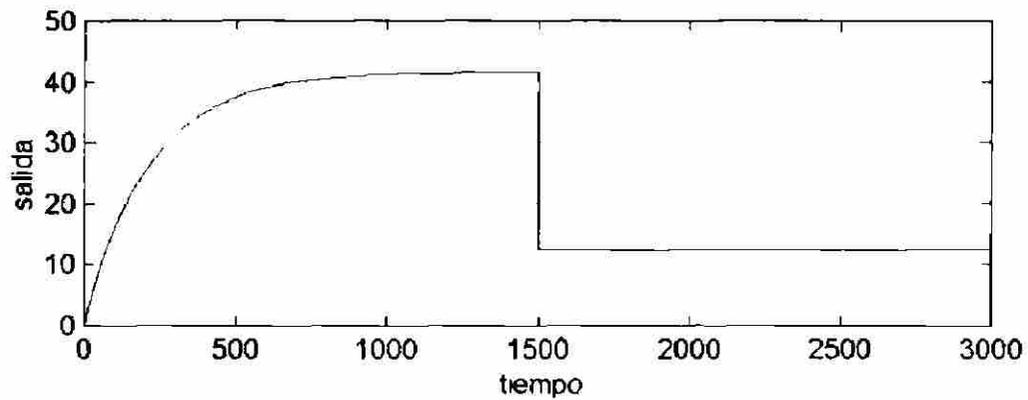


Fig. 4.7. Salida del sistema al presentarse la falla del 70% en los sensores

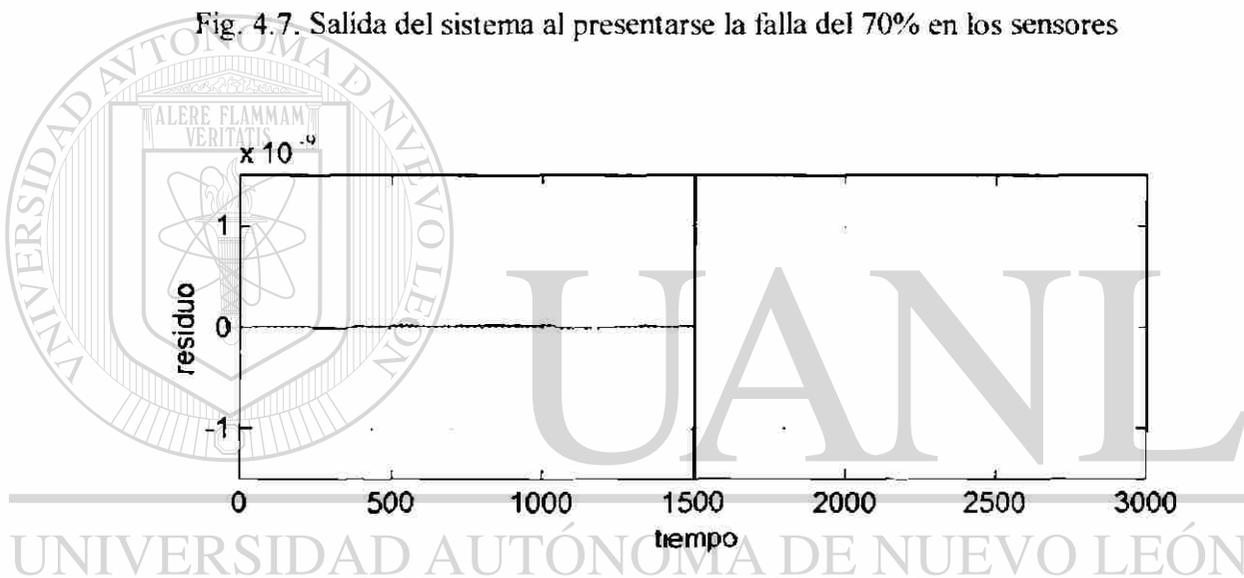


Fig. 4.8. Residuo 1 al presentarse la falla del 70% en los sensores

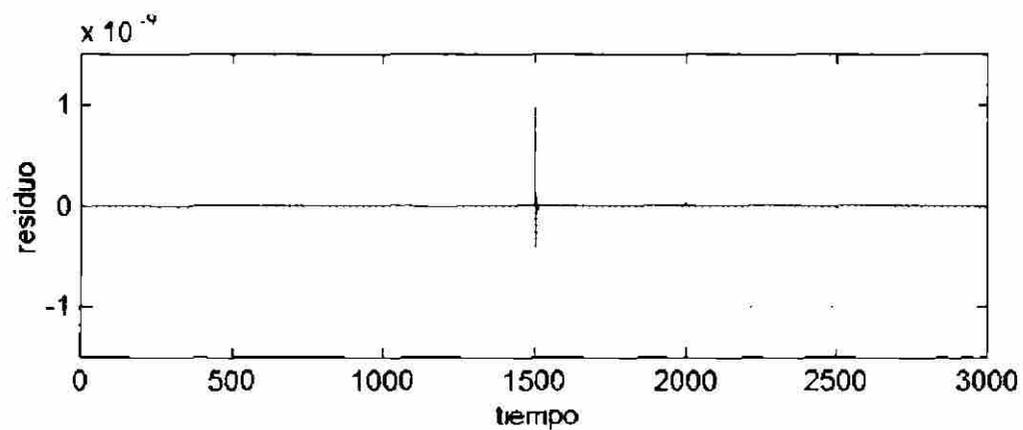


Fig. 4.9. Residuo 2 al presentarse la falla del 70% en los sensores

Graficas al presentarse la falla en el actuador (FA=0.3) al tiempo de 1500 segundos.

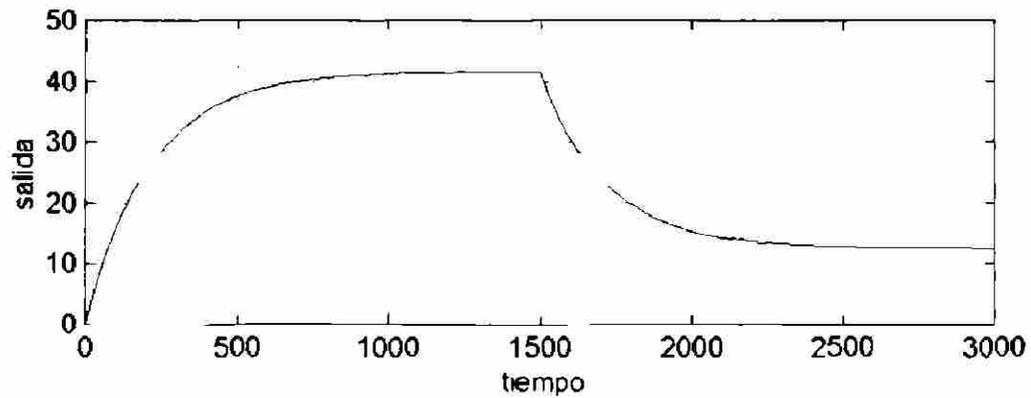


Fig. 4.10. Salida del sistema al presentarse la falla del 70% en el actuador

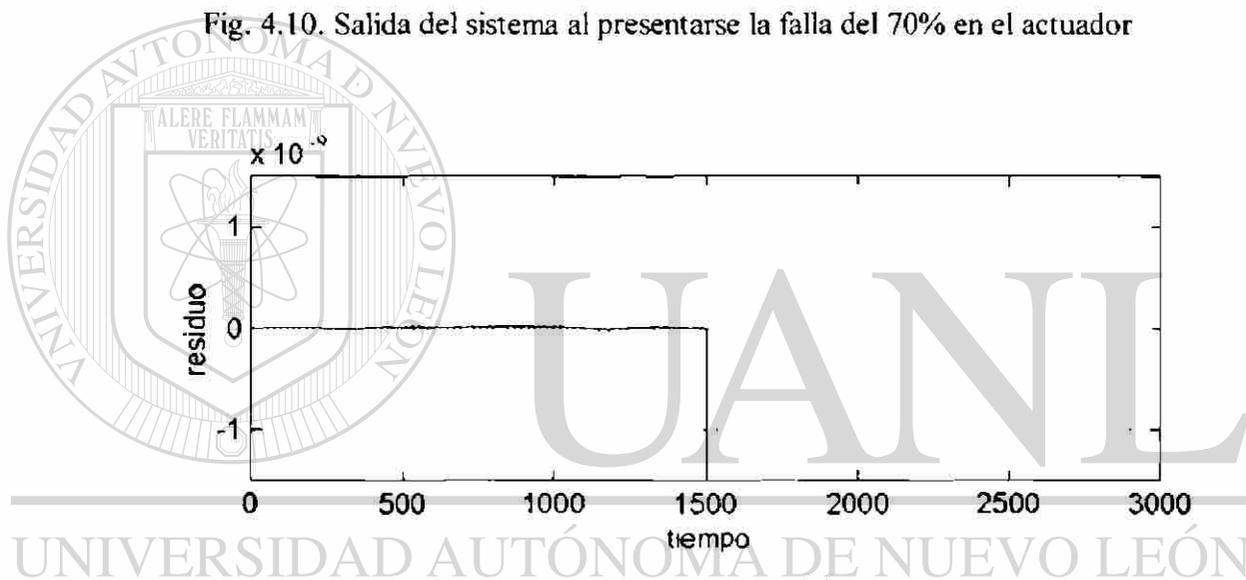


Fig. 4.11. Residuo 1 al presentarse la falla del 70% en el actuador

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

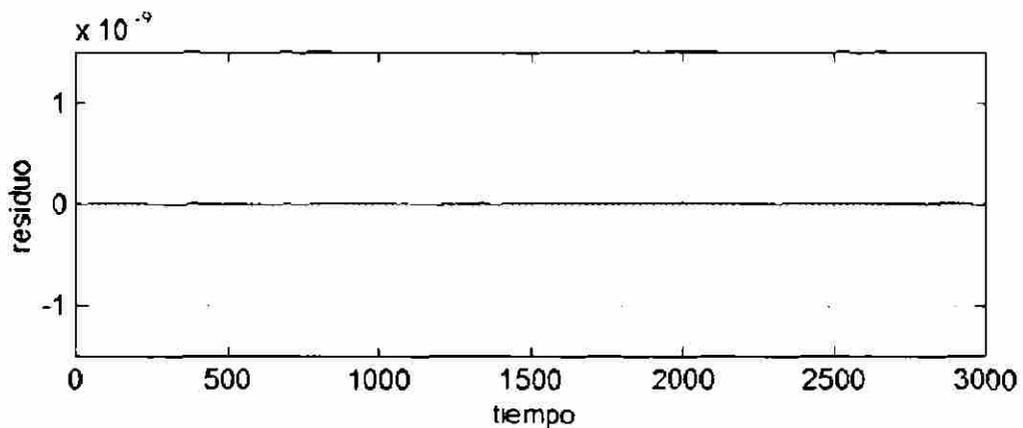


Fig. 4.12. Residuo 2 al presentarse la falla del 70% en el actuador

La escala de las graficas se tomo de tal forma que se pudiera apreciar la sensibilidad de los residuos. Los valores absolutos máximos de los picos en cada grafica de los residuos son:

Residuo 1 cuando se presenta la falla FS del 70%  $\rightarrow$  30 cm

Residuo 2 cuando se presenta la falla FS del 70%  $\rightarrow$   $1 \times 10^{-9}$  cm

Residuo 1 cuando se presenta la falla FA del 70%  $\rightarrow$  0.023 cm

Residuo 2 cuando se presenta la falla FA del 70%  $\rightarrow$   $6 \times 10^{-12}$  cm

(La señal de este residuo se puede confundir con ruido de la señal)

Teniendo ya los comportamientos de los residuos en cada caso, se forma la tabla en donde representaremos la sensibilidad de los generadores de residuos a cada falla. Se usará 1 (uno) cuando sea sensible y 0 (cero) cuando no lo sea.

Residu	Falla	FS del 70%	FA del 70%	Sin Fallas
<b>Residuo 1</b>		1	1	0
<b>Residuo 2</b>		1	0	0

Tabla 4.1. Tabla de sensibilidad de los generadores de residuos a las fallas

La evaluación lógica de los residuos sería de esta manera: si existe señal de ambos residuos, entonces esta presente la falla FS; si existe señal del residuo 1 pero no existe del residuo 2, entonces esta presente la falla FA, si no existe señal de ningún residuo, entonces no hay falla de sensor ni de actuador.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 DISCUSIÓN

El comportamiento de los residuos, en presencia de las fallas consideradas, fue satisfactorio pues se logró obtener sensibilidad de los generadores de residuos a las fallas y además localizarlas.

Así se obtuvo un resultado importante sobre la falta de detectabilidad de fallas y la manera de recobrar esta sensibilidad.

Como puede apreciarse de los resultados de la sección anterior, hay fallas que no pueden detectarse con un residuo dado. Esto representa un problema serio cuando el sistema que está siendo supervisado puede presentar estados peligrosos. En este trabajo se propone una metodología para asegurar que las fallas de interés sean detectadas mediante el uso de residuos basados en observadores y se aprovecha la insensibilidad para localizar dichas fallas.

Una primera observación de la técnica propuesta nos muestra que el número de residuos requerido aumenta al aumentar el número de fallas consideradas, en contraste con la manera clásica de llevar a cabo la detección. Se requiere también un trabajo más intenso respecto al análisis y diseño de los generadores de residuos. Aunque la verificación de las condiciones de sensibilidad no es sencilla, es posible apoyarse en programas de computadora así como en el lenguaje de programación de matemáticas MatLab.

La programación en MatLab permite tanto el manejo de sistemas en espacio de estado como en representación entrada – salida además de facilitar el cálculo de factorizaciones y operaciones con matrices de transferencia.

El uso de lenguaje simbólico es una gran ventaja de este lenguaje de programación. Otro punto muy favorable es el que se puede conectar de manera directa con Simulink. De esta forma el diseño completo se puede hacer en un programa ejecutable (dentro del ambiente de MatLab) y los resultados se pueden utilizar directamente para la simulación dinámica del sistema. Una desventaja es que eventualmente el manejo de las cancelaciones de los elementos que aparecen en numerador y denominador no se realizan, haciendo que el resultado aparezca con polinomios de orden mucho mayor al que realmente se requieren. Para que se puedan realizar las cancelaciones de polos y ceros se utiliza un comando de MatLab (ver información del comando “minreal”).

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Al aplicar el método propuesto se puede observar como verificar que las fallas sean detectadas y además localizarlas. Aunque el procedimiento es algo laborioso bien vale la pena el seguirlo para poder garantizar una detección de fallas segura.

## 6. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

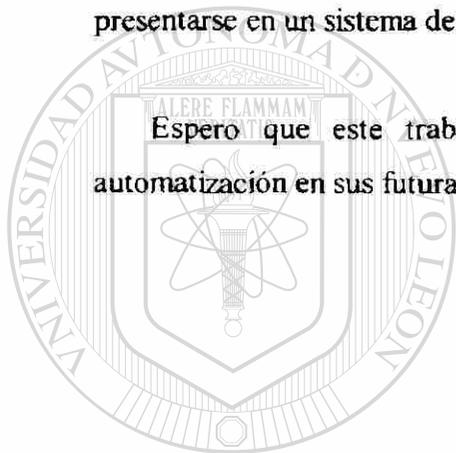
Utilizando un observador sensible a una falla específica se garantiza que el generador de residuos diseñado con este observador, sea sensible a la falla mencionada, pero por otro lado, también se puede diseñar un observador que sea insensible a alguna falla de interés. Utilizando este principio se obtuvo un conjunto de generadores de residuos cada uno insensible a cierta falla. Con esto se tienen tantos generadores de residuos como fallas consideradas de importancia, haya en el sistema. Esto es con el propósito de que diferentes residuos sean sensibles a distintas fallas y así poder lograr la localización de la falla, a parte de la detección de esta.

De esta manera se recobró la sensibilidad a ciertas fallas multiplicativas de los generadores de residuos basados en observadores y además el aislamiento para las fallas consideradas de interés.

## 6.2 RECOMENDACIONES

En esta investigación se mostró la importancia de la detección de fallas en sistemas de control, con esto se espera que despierte el interés por seguir investigando en esta área ya que los resultados obtenidos en este trabajo son muy particulares. No dudo que se pueda llegar a mejores deducciones y a condiciones matemáticas mas generales relacionadas con fallas multiplicativas o fallas en general, utilizando generadores de residuos basados en observadores o utilizando otros métodos. Inclusive se podría trabajar en encontrar una estrategia para detectar y localizar a todas las fallas que puedan presentarse en un sistema de una manera robusta y mas sencilla.

Espero que este trabajo les sea de utilidad a los ingenieros de control y automatización en sus futuras investigaciones en el área de detección de fallas.



# UANL

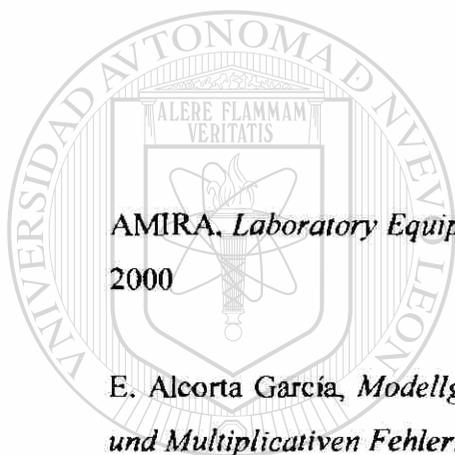
---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## BIBLIOGRAFÍA



AMIRA, *Laboratory Equipment for Research and Practical of Control Engineering*. 2000

E. Alcorta García, *Modellgetützte Residuengenerierung für die Diagnose von Additiven und Multiplicativen Fehlern in Dynamischen Systemen*, VDI Verlag GMBH 1999

E. Alcorta García and A. D. Salas Armendáriz, *On the sensivity of observer-based residual to multiplicative faults*. In Submitted to the CDC 2002, pages -, 2002. ®

### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

E. Alcorta García and E. Páez Castillo, *Linear Observer-Based FDI of Multiplicative Faults*. IASTED 2002

E. Alcorta García and P. M. Frank. Multiplicative fault insolation in linear systems. In *Proc. Of the conference on Decision and Control*, Phonex, Arizona, USA, Dez. 1999.

H. L. Jones. Failure detection in linear systems. Ph.D. Dissertation, M.I.T., Cambridge, MA, 1973.

Jie Chen, Ron J. Patton. *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer Academic Publishers, USA, 1999.

J. Wünnenberg. *Observer-Based Fault Detection in Dynamic Systems*. VDI-Fortschrittsber., VDI-Verlag, Reihe 8, Nr. 222, Düsseldorf, Germany, 1990.

M. Basseville. On fault detectability and isolability. In *Proc. Of the European Control Conference*. Karlsruhe, Germany, August 1999.

Paul M. Frank. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy a survey. *Automatica*, 26:459-474, 1990.

Paul M. Frank. Frequency domain approach to optimally robust residual generation and evaluation for model based fault diagnosis. *Automatica*, 30(5):789-804, 1994.

Paul M. Frank 'Introduction to System Sensitivity Theory' Academic Press, New York, San Francisco, London, 1978.

P. M. Frank and X. Ding, "Current developments in the theory of FDI", *IFAC Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*, Budapest, Hungary, 2000

P. M. Frank and X. Ding. "Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems", *J. Proc. Cont.* Vol. 6. pp. 403-424, 1997

R. Isermann. On the applicability of model-based fault detection for technical process. *Control Eng. Practice*, 2(3):439-450, 1994.

R. Isermann. Process fault detection based on modeling and estimation methods-A survey. *Automatica*, 20:387, 1984.

R. V. Beard. *Failure acomodation in linear sistems.through self reorganization*. Ph.D. Dissertation, M.I.T., 1971.

S. X. Ding, P. Zhang and P. M. Frank. "Study on Detecting Multiplicative Faults in Linear Dynamic Systems". ACC03-IEEE0602, 2002.

X. Ding and P. M. Frank. "Frecuency domain approach and threshold selector for robust model-based fault detection and isolation". *IFAC/IMACS*, 1991.

X Ding, L. Guo, and P. M. Frank. "Parametrization of Linear Observers and its Application to Observer Design". *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 39, No 8, pp 1648-1656, August 1998.

Xianchun Ding, *Frequenzbereichsverfahren zur beobachtergestützten Fehlerentdeckung*. VDI-Verlag GmbH, 1992.

Y. X. Yao, M. Darouach and J. Schaeffers. "Simultaneous Observation of Linear systems". *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol 40, pp. 696-699, 1995.

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

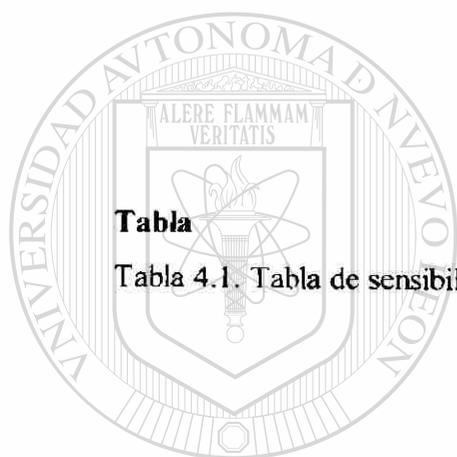
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Fig. 2.1. Generador de residuos utilizando un observador	12
Fig. 2.2. Generador de residuos utilizando post-filtro	16
Fig. 2.3. Estructura general del esquema observador	17
Fig. 4.1. Sistema de tanques	26
Fig. 4.2. Implementación del generador de residuos en Simulink	36
Fig. 4.3. Implementación del modelo matemático del sistema de dos tanques	37
Fig. 4.4. Salida del sistema en condiciones nominales	38
Fig. 4.5. Residuo 1 en condiciones nominales	38
Fig. 4.6. Residuo 2 en condiciones nominales	38
Fig. 4.7. Salida del sistema al presentarse la falla del 70% en los sensores	39
Fig. 4.8. Residuo 1 al presentarse la falla del 70% en los sensores	39
Fig. 4.9. Residuo 2 al presentarse la falla del 70% en los sensores	39
Fig. 4.10. Salida del sistema al presentarse la falla del 70% en el actuador	40
Fig. 4.11. Residuo 1 al presentarse la falla del 70% en el actuador	40
Fig. 4.12. Residuo 2 al presentarse la falla del 70% en el actuador	40

## LISTADO DE TABLAS



**Tabla**

Tabla 4.1. Tabla de sensibilidad de los generadores de residuos a las fallas

**Página**

41

UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## GLOSARIO

**Falla.** Es el cambio no aceptado en los parámetros del el sistema

**FDI.** Fault Detection and Isolation. Detección y Aislamiento de Fallas

**Modelo matemático.** Representación del comportamiento de un sistema en forma matemática

**Observador.** Estrategia matemática para generar una estimación del comportamiento de un sistema

**Parámetros.** Datos que se utilizan para obtener el modelo matemático del sistema

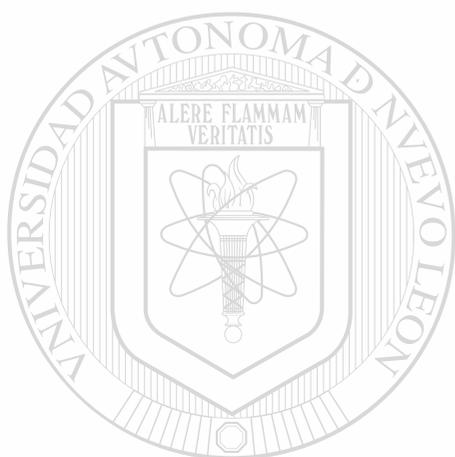
**Proceso.** Secuencia de pasos que se siguen para realizar una tarea específica

**Residuo.** Es la diferencia de la salida del sistema y la salida estimada

**Sistema.** Elementos que trabajan en conjunto para realizar una tarea determinada

**Variable.** Valor que no es fijo, valor cambiante

**Variables de Estado.** Son funciones auxiliares las cuales junto con las condiciones iniciales nos ayudan a lograr una descripción completa del comportamiento del sistema



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## APÉNDICE A



### LINEALIZACIÓN

Teniendo que el sistema no lineal es

$$\dot{h} = f(h, Q)$$

(A.1a)

$$y = Ch$$

(A.1b)

donde

$$h = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix}$$

(A.2)

$$Q = [Q_1]$$

(A.3)

Y la linealización se hará con respecto a los puntos de operación

$$h_0 = \begin{bmatrix} h_{01} \\ h_{02} \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

$$Q_0 = [Q_{01}] \quad (\text{A.5})$$

para obtener un sistema lineal de la forma

$$\Delta h = A\Delta h + B\Delta Q \quad (\text{A.6a})$$

$$\Delta y = C\Delta h \quad (\text{A.6b})$$

donde

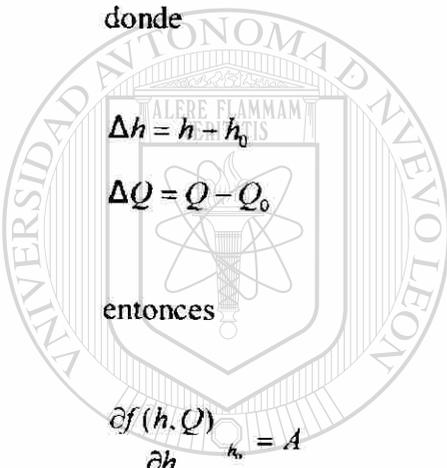
$$\Delta h = h - h_0 \quad (\text{A.7})$$

$$\Delta Q = Q - Q_0 \quad (\text{A.8})$$

entonces

$$\frac{\partial f(h, Q)}{\partial h} \Big|_{h_0} = A \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{\partial f(h, Q)}{\partial Q} \Big|_{Q_0} = B \quad (\text{A.10})$$



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## APÉNDICE B



### CONTROLABILIDAD Y OBSERVABILIDAD

Dado el sistema descrito mediante las ecuaciones

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad x(0) = x_0 \quad (2.3a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2.3b)$$

donde  $x \in \mathbb{R}^n$  es el vector de estado,  $u \in \mathbb{R}^p$  el vector de entrada,  $y \in \mathbb{R}^m$  es el vector de las mediciones de salida y A, B, C son matrices de dimensiones apropiadas, es de salida completamente controlable si y solo si la matriz de controlabilidad

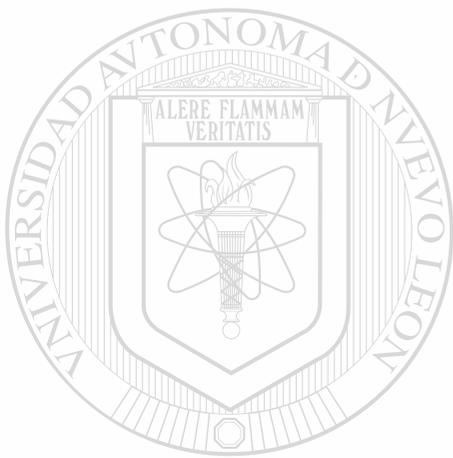
$$Q_c = [B \quad AB \quad \dots \quad A^{n-1}B]$$

es de rango  $n$ .

Así también el sistema es completamente observable si y solo si la matriz de observabilidad

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

es de rango  $n$ .



# UANL

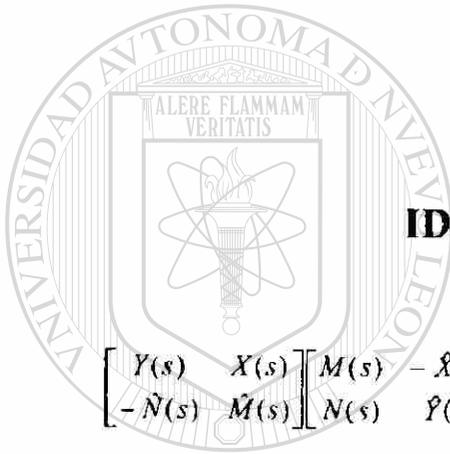
---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## APÉNDICE C



### IDENTIDAD DE BENZOUT

$$\begin{bmatrix} Y(s) & X(s) \\ -\hat{N}(s) & \hat{M}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M(s) & -\hat{X}(s) \\ N(s) & \hat{Y}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(s) & \hat{X}(s) \\ N(s) & \hat{Y}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y(s) & -X(s) \\ \hat{N}(s) & \hat{M}(s) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (\text{C.1})$$

Donde

$$\hat{M}(s) = C(sI - A_L)^{-1}L + I \quad (\text{C.2})$$

$$\hat{N}(s) = C(sI - A_L)^{-1}B_L + D \quad (\text{C.3})$$

$$M(s) = K(sI - A_K)^{-1}B + I \quad (\text{C.4})$$

$$N(s) = C_K(sI - A_K)^{-1}B + D \quad (\text{C.5})$$

son la doble factorización coprima de  $G(s)$  y satisfacen

$$\hat{M}^{-1}(s)\hat{N}(s) = G(s) \quad (\text{C.6})$$

$$N(s)M^{-1}(s) = G(s) \quad (\text{C.7})$$

y

$$Y(s) = -K(sI - A_L)^{-1} B_L + I \quad (\text{C.8})$$

$$X(s) = -K(sI - A_L)^{-1} L \quad (\text{C.9})$$

$$\hat{Y}(s) = C_K(sI - A_K)^{-1} L + I \quad (\text{C.10})$$

$$\hat{X}(s) = -K(sI - A_K)^{-1} L \quad (\text{C.11})$$

$\in RH_\infty$  (matrices racionales, estables y propias)

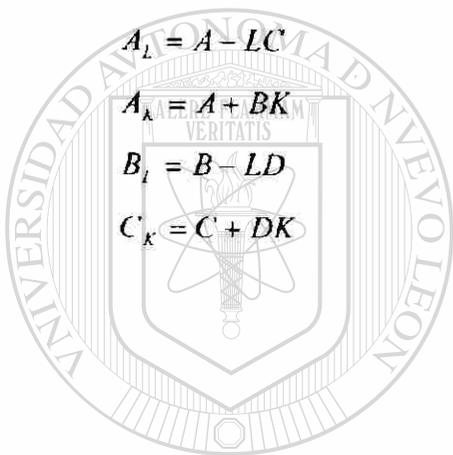
$I$  = Matriz identidad de dimensiones apropiadas

$$A_L = A - LC \quad (\text{C.12})$$

$$A_K = A + BK \quad (\text{C.13})$$

$$B_L = B - LD \quad (\text{C.14})$$

$$C_K = C + DK \quad (\text{C.15})$$



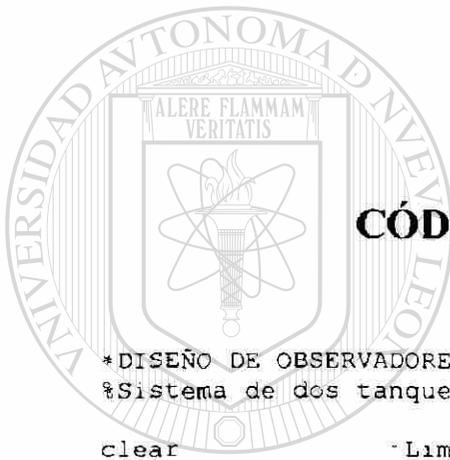
# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## APÉNDICE D



### CÓDIGO FUENTE EN MATLAB

\*DISEÑO DE OBSERVADORES PARA SISTEMAS LINEALES %  
 %Sistema de dos tanques

clear                    % Limpia memoria  
 format long            % Permite utilizar 15 dígitos después del punto

\*Valores de fallas y factores  
 FB0=0;  
 FLO=0;  
 T=1;  
 H=1;

\*Matrices del sistema nominal  
 A0=[- 1 FB \* 5.56823e-3 - FLO)\* 0.011389425) 1-FB0 \* 5.56823e-3);  
 (1-FB0)\* 5.56823e-3) - 1-FB0 \* 5.56823e-3)-0.027939168];  
 B0=[1/0.0154;0 ;  
 C0=[1 -1];  
 D0=[0];  
 SSG0=ss A0,B0,C0,D0 ;  
 TFG0=TF SSG0 ;  
 eigen0=eig A0);  
 pk0=[-1.3;-1.35];  
 K0=place A ,B0,pk0 ;  
 K0=-K0;  
 AK0=A0+B0\*K0;  
 p10=[-2.65;-2.85];  
 L0=place A0',C0',p10 ;  
 L0=L0';

```
AL0=A0-L0*C0;
```

```
%Dado que z=Eh
```

```
*z es la salida a ser observada, h es el vector de estados
```

```
E0=H*C0;
```

```
%Valores de fallas para el sistema
```

```
FB1=0;
```

```
FL1=0;
```

```
FS1=0.3;
```

```
FA1=1;
```

```
%Matrices del sistema con falla en el actuador del 70%
```

```
A1=[-(1-FB1)* 5.56823e-3 -(FL1 * 0.011389425) (1-FB1)* 5.56823e-3);  
      (1-FB1)*(5.56823e-3) -(1-FB1 * (5.56823e-3 -0.027939168)];
```

```
B1=FA1*[1/0.0154;0];
```

```
C1=FS1*[1 -1];
```

```
D1=[0];
```

```
SSG1=ss(A1,B1,C1,D1 ;
```

```
TFG1=TF(SSG1 ;
```

```
*Valores de fallas para el sistema
```

```
FB2=0;
```

```
FL2=0;
```

```
FS2=1;
```

```
FA2=0.3;
```

```
%Matrices del sistema con falla en los sensores del 70%
```

```
A2=[ 1-FB2 * (5.56823e-3) (FL2)* 0.011389425 1-FB2*(5.56823e-3);  
      1-FB2 * (5.56823e-3) -(1-FB2 * (5.56823e-3)-0.027939168)];
```

```
B2=FA2*[1/0.0154;0];
```

```
C2=FS2*[1 -1];
```

```
D2=[0];
```

```
SSG2=ss(A2,B2,C2,D2);
```

```
TFG2=TF(SSG2 ;
```

```
eigen2=eig(A2);
```

```
pk2=[-0.16;-0.17];
```

```
K2=place(A2,B2,pk2 ;
```

```
K2=-K2;
```

```
AK2=A2+B2*K2;
```

```
pl2=[-0.40;-0.41];
```

```
L2=place(A2',C2',pl2 ;
```

```
L2=L2';
```

```
AL2=A2-L2*C2;
```

```
*Dado que z=Eh
```

```
*z es la salida a ser observada, h es el vector de estados
```

```
E2=H*C2;
```

```
*donde H es un escalar
```

```
%Factores de la doble factorizacion coprime
```

```
SSM0 = SS(AK0,B0,K0,1 ;
```

TFM0=TF SSM0

SSM0g = SS (AL0, L0, -C0, 1);  
TFM0g=TF(SSM0g);

SSN0g = SS (AL0, B0, C0, D0 ;  
TFN0g=TF SSN0g);

SSN0 = SS (AK0, B0, C0, D0 ;  
TFN0=TF SSN0 ;

SSY0 = SS (AL0, B0, -K0, 1);  
TFY0=TF SSY0);

SSX0 = SS (AL0, L0, -K0, 0 ;  
TFX0=TF(SSX0);

SSY0g = SS (AK0, L0, C0, 1 ;  
TFY0g=TF(SSY0g ;

SSM2 = SS (AK2, B2, K2, 1);  
TFM2=TF(SSM2);

SSM2g = SS (AL2, L2, -C2, 1);  
TFM2g=TF SSM2g

SSN2g = SS (AL2, B2, C2, D2 ;  
TFN2g=TF SSN2g)

SSN2 = SS (AK2, B2, C2, D2);  
TFN2=TF SSN2 ;

SSY2 = SS (AL2, B2, -K2, 1 ;  
TFY2=TF SSY2

SSX2 = SS (AL2, L2, -K2, 0);  
TFX2=TF SXX2

SSY2g = SS (AK2, L2, C2, 1 ;  
TFY2g=TF SSY2g)

\*Calculo de P0 que es el sistema nominal retroalimentado

SSP0 = SS (AK , B0, E , 0 ;  
TFP0=TF SSP0 ;

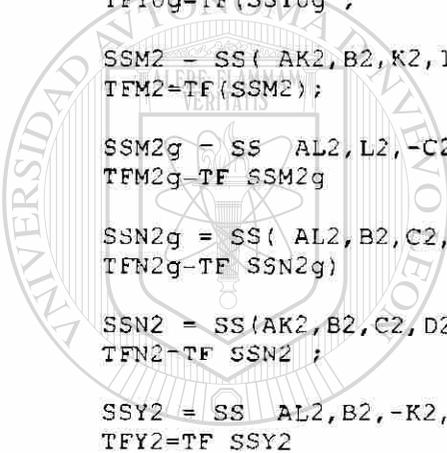
\*Calculo de P2 que es el sistema 2 retroalimentado

SSP2 = SS (AK2, B2, E2, 0 ;  
TFP2=TF SSP2 ;

\*Diseño del Generador de residuos

As=TFY0\*TFM2+TFX0\*TFN2;  
As=minreal As ;

Bs=TFN0g\*TFM2+TFM0g\*TFN2;  
Bs=minreal Bs ;



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

```

q1=TFP0*As;
q1=minreal q1 ;
q2=TFP2-q1;
q2=minreal(q2 ;
q3=q2/Bs;
q3=minreal(q3);
Q0=q3

```

```

R0=Q0-H*TFY0g;
R0=minreal R0

```

```

d_R0=R0.den{1};
n_R0=R0.num{1};

```

```

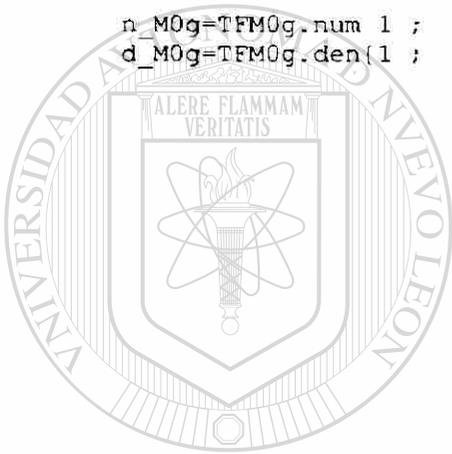
n_N0g=TFN0g.num{1};
d_N0g=TFN0g.den{1};

```

```

n_M0g=TFM0g.num{1};
d_M0g=TFM0g.den{1};

```



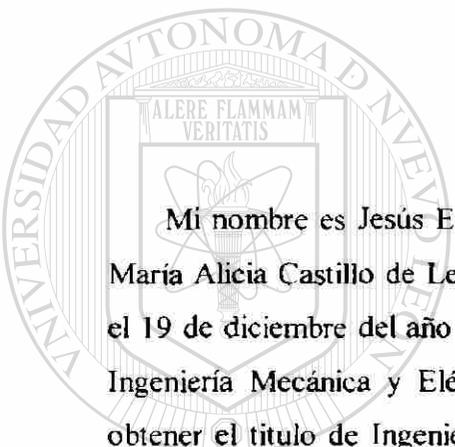
# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO



Mi nombre es Jesús Enrique Páez Castillo, mis padres son Eduardo Páez Chávez y María Alicia Castillo de León. Nací en San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, el 19 de diciembre del año de 1979. Estudie mi carrera de licenciatura en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León para obtener el título de Ingeniero en Control y Computación. Tengo experiencia en el área de automatización y control de procesos. Ahora presento esta tesis que lleva por título “**RECOBRO DE SENSIBILIDAD A CIERTAS FALLAS MULTIPLICATIVAS DE LOS GENERADORES DE RESIDUOS BASADOS EN OBSERVADORES**” para obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con la especialidad en Control, cursado en la División de Estudios de Post-grado de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

