

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO**



**CARACTERIZACION DE LA SENSIBILIDAD A CIERTAS  
FALLAS MULTIPLICATIVAS DE LOS GENERADORES  
DE RESIDUOS BASADOS EN OBSERVADORES**

**POR**

**ING. ALETHYA DEYDREE SALAS ARMENDARIZ**

**T E S I S**

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

**CD. UNIVERSITARIA, DICIEMBRE DEL 2002**



2071 27 F  
2072 25 F  
2073 28 F  
2074 25 F  
3

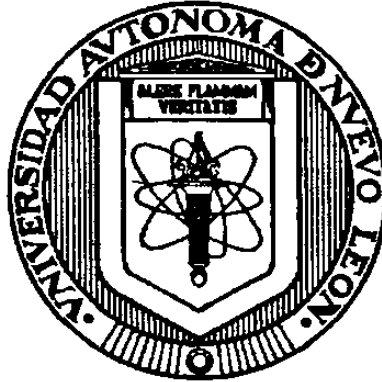
CARACTERIZACION DE LA SENSIBILIDAD A CIERTAS FALLAS MULTIPLICATIVAS  
DE LOS GENERADORES BASADOS EN OBSERVADORES

LD SA



1020148554

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



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

POR

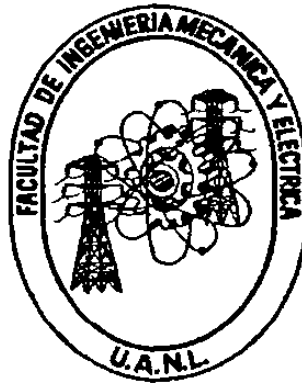
ING. ALETHYA DEYDREE SALAS ARMENDÁRIZ

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD EN CONTROL

CD. UNIVERSITARIA; DICIEMBRE DEL 2002

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



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

POR

ING. ALETHYA DEYDREE SALAS ARMENDÁRIZ

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD EN CONTROL

CD. UNIVERSITARIA; DICIEMBRE DEL 2002

TH  
2585  
.H2  
F1.F  
2002  
.S24



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 “**Caracterización de la sensibilidad a ciertas fallas multiplicativas de los generadores de residuos basados en observadores**”, realizada por la alumna Ing. Alethya Deydree Salas Armendáriz, matrícula 923271 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Control.

El comité de Tesis



Dr. Efraín Alcorta García

Asesor



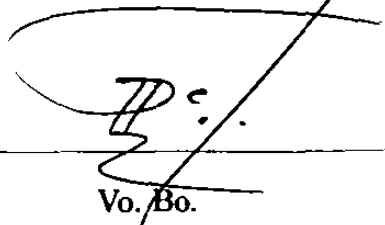
Dr. Ernesto Vázquez Martínez

Coasesor



Dr. César Elizondo González

Coasesor



Vo. Bo.

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez

División de Estudios de Post-grado

Diciembre del 2002

# PRÓLOGO

Desde el principio de los tiempos, el hombre antediluviano vio azorado el mundo que lo rodeaba y sintió algo milenario y atávico que sobrevive aun hasta nuestros días; el terror a lo desconocido. El hombre veía al sol, al rayo, al fuego, a la lluvia... ¡A la naturaleza entera!, y sentía respeto por ella, pues no podía explicarse cosas tan maravillosas como aterradoras a la vez, ¿Que es eso que brilla en el cielo?, ¿Que es eso que no es de este mundo pero nos ilumina?, ¿Porque es tan bueno y a veces tan cruel con nosotros?. Así surgió la religión.

Con el paso del tiempo el hombre aumento su inteligencia y su curiosidad, el ya no se conformaba con saber que algo o alguien velaba por el, ya no se interesaba solo en eso y, junto a cuestiones como el “que”, el “cuando”, el “donde” ó el “porque”, surgió la pregunta: El “como”. Así fue como apareció la ciencia.

La ciencia (que en si tiene algo de mística) a lo largo de la historia trata de revelar los secretos del mundo al ser humano, procurando ir un poco mas allá de la religión, la filosofía y la metafísica (que une el alma con el cuerpo), dando datos, cifras, cantidades y razones lógicas a base de matemáticas, física, química, biología, mecánica, etc.

Desde Galileo, Newton y su famosa manzana, pasando por Planck, el revolucionario y desasosegante Einstein y mas recientemente Hawking, los avances logrados para una mejor clarificación de los fenómenos dados en nuestra realidad han sido apabullantes, a un grado tal que los ingenios tecnológicos descritos por Julio Verne y por H.G. Wells en sus novelas de ciencia ficción son hoy el pan nuestro de cada dia,



o en su defecto, ideas con una muy buena posibilidad de ser puestas en practica.

Y es que el hombre ya no quiere sentirse un ser inferior mas, desea llegar al fondo de las cosas, trascender su entorno y lograr que algún dia lo desconocido sea cosa del pasado y así llegar a un estado en que todo ser humano comprenda a la perfección a este mundo en que le toco vivir y no verse supeditado a las misteriosas fuerzas de la naturaleza, sino que esta (dentro de los limites razonables, claro) le sirva para tener una vida mejor y sentirse mas cómodo y despreocupado... ¡El hombre ya no quiere sentir miedo!

Esta perfección es lo que ha empujado al ser humano a ir mas allá, a tratar de detectar la existencia de errores y poder evitarlos, pues así se llegará en un futuro a la comprensión de todas las cosas, desde el espacio interno (nuestro propio cuerpo), hasta el exterior (el sideral).

Aun así, con todos los sorprendentes conocimientos adquiridos hasta nuestros dias, el mundo sigue manteniendo su dosis de poesía, allá donde el misterio hace esquina con lo desconocido, la ciencia, en comparación con todo lo que nuestro planeta posee, se halla aún en pañales.

Por eso, día a dia, la ciencia y sus "cómplices" siguen tratando de penetrar mas y mas en la profundidad del porque y el como de las cosas.

El dia en que por fin se logre que la ciencia ficción sea cosa del pasado, sigue siendo aun una inquietante incógnita.

Esta tesis está sometida como requerimiento parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Control que es impartida por la División de Estudios de Post-grado de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

La investigación para la realización de este trabajo se realizó desde Febrero del 2001 y se terminó en Octubre del 2002 bajo la supervisión del Dr. Efraín Alcorta García. La tesis considera la detección de fallas multiplicativas en sistemas lineales

aplicada principalmente a sistemas de primer orden pero que se puede extender a sistemas de orden mayor.

# ÍNDICE

<b>SÍNTESIS</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA . . . . .	3
1.2. OBJETIVO DE LA TESIS . . . . .	4
1.3. HIPÓTESIS . . . . .	4
1.4. LÍMITES DEL ESTUDIO . . . . .	4
1.5. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO . . . . .	4
1.6. METODOLOGÍA . . . . .	5
1.7. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA . . . . .	5
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>8</b>
2.1. HISTORIA . . . . .	8
2.2. DETECCIÓN DE FALLAS . . . . .	9
2.3. OBSERVACIÓN PARA FDI . . . . .	12
2.3.1. REPRESENTACIÓN MEDIANTE FACTORIZACIONES DEL SISTEMA Y DEL OBSERVADOR . . . . .	17
2.3.2. CONSTRUCCIÓN DEL GENERADOR DE RESIDUOS .	19
<b>3. SENSIBILIDAD A LAS FALLAS MULTIPLICATIVAS DE LOS GENERADORES DE RESIDUOS BASADOS EN OBSERVADO- RES</b>	<b>22</b>

3.1. IDEA BÁSICA . . . . .	22
3.2. FALTA DE DETECTABILIDAD DE FALLAS Y CÁLCULO DE SENSIBILIDAD . . . . .	23
<b>4. EVIDENCIA EXPERIMENTAL</b>	<b>27</b>
4.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO . . . . .	27
4.1.1. HARDWARE . . . . .	27
4.1.2. SOFTWARE . . . . .	30
4.2. PLANIFICACIÓN DEL EXPERIMENTO . . . . .	30
4.2.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA . . . . .	31
4.3. SIMULACIÓN . . . . .	32
4.4. RESULTADOS . . . . .	36
<b>5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>44</b>
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>45</b>
6.1. CONCLUSIONES . . . . .	45
6.2. RECOMENDACIONES . . . . .	45
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>46</b>
<b>LISTADO DE TABLAS</b>	<b>49</b>
<b>LISTADO DE FIGURAS</b>	<b>50</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>51</b>
<b>APÉNDICE A. FACTORIZACIÓN DE MATRICES DE TRANSFERENCIA</b>	<b>52</b>

<b>APÉNDICE B. CÁLCULO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA</b>	<b>54</b>
<b>APÉNDICE C. PROGRAMA EN MATLAB PARA CALCULAR LAS ECUACIONES DEL POST-FILTRO <math>R(s)</math></b>	<b>57</b>
<b>RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO</b>	<b>63</b>



# SÍNTESIS

Esta tesis considera las fallas que se ven involucradas con los sistemas lineales.

Al comienzo de los años 70's se desarrolló el diagnóstico de fallas basado en modelos. En ese tiempo era muy común encontrar la redundancia en hardware dentro de los procesos para detectar las fallas que pudieran ocurrir, esto representaba un costo muy alto en el diseño de sistemas, además, este exceso de hardware hacía más pesado el equipo y en ocasiones difícil de darle mantenimiento.

La redundancia de software, creada a partir del desarrollo del diagnóstico de fallas basado en modelos por Beard en el Instituto Tecnológico de Massachusetts ("MIT") eliminó los problemas que había con la redundancia de hardware, aunque creó otros distintos.

El diagnóstico de fallas basado en modelos tiene dos etapas principales, generar residuos y tomar decisiones. El propósito de generar residuos es el de obtener una señal, llamada residuo, que indique que existe una falla en el sistema usando solamente información disponible de la entrada del sistema y la salida del sistema. En la toma de decisiones se analiza el residuo para detectar la falla. Existen diferentes métodos, pero los más conocidos son la estimación de parámetros, las ecuaciones de paridad y el método basado en observadores de estado.

En esta tesis se considerará solamente el método basado en observadores de estado. Este método fué relacionado históricamente con fallas aditivas. Estas fallas se representan matemáticamente como entradas externas en el sistema, lo que les

permite separar sus efectos en el sistema relativamente con gran facilidad. Sin embargo, las fallas que ocurren dentro del sistema tienen en su mayoría una naturaleza multiplicativa [1]. Esta forma de representar las fallas hace necesario extender la teoría hasta ahora solo disponible para detectar fallas aditivas en sistemas [2].

Esta tesis está altamente relacionada con [2] ya que se generó en el transcurso de la investigación de la misma. Se puede observar como se construyen los generadores de residuos basados en observadores utilizando fallas multiplicativas. Se puede observar también que cuando se utilizan ciertas ecuaciones claves para la generación de residuos tomando en cuenta fallas aditivas, al aplicar las mismas ecuaciones para fallas multiplicativas, este residuo generado será insensible a la falla, es decir, el residuo no detectará un cambio en el sistema y permanecerá como si no hubiera ocurrido una falla interna.

Lo anterior se puede mostrar cuando se diseñan post-filtros  $R(s) \in RH_\infty$  que cumplen con la siguiente condición:

$$R(s) = Q(s) - PY(s)$$

esta ecuación esta desarrollada más adelante.

Cabe aclarar que el objetivo principal de la tesis no es construir post-filtros  $R(s)$  insensibles a fallas. Lo que se quiere probar es que existen puntos débiles que deben ser mejorados cuando se utilizan generadores de residuos basados en observadores en la detección de fallas.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los métodos basados en observadores para detección y aislamiento de fallas (abreviado "FDI" por sus siglas en inglés) han sido desarrollados durante aproximadamente 30 años. Con frecuencia, los métodos basados en observadores están asociados con fallas aditivas, las cuales se representan como entradas nuevas en el sistema, lo cual permite manejarlas con métodos lineales conocidos. Sin embargo, en muchos casos prácticos, las fallas son de naturaleza multiplicativa, dando por hecho que una falla multiplicativa es un cambio no permitido en los parámetros del sistema que se encuentra multiplicando a los estados y/o a las entradas del sistema y, aunque este tipo de fallas es frecuentemente asociado con métodos de "FDI" basados en estimación de parámetros, existen algunos resultados recientes que relacionan las fallas multiplicativas con los métodos basados en observadores, aún si no son lineales. Existe un defecto cuando se usan generadores de residuos basados en observadores para ciertas fallas multiplicativas y, en base a la observación simultánea, se puede demostrar que el generador de residuos es insensible a un conjunto específico de fallas. Esto último ocasiona que algunas veces los métodos de diagnóstico basados en observadores fallen en la detección.

## **1.2. OBJETIVO DE LA TESIS**

Caracterizar el conjunto de fallas para las cuales los métodos basados en observadores no logran detectarlas. Para alcanzar este objetivo se utilizará teoría de sensibilidad y resultados recientes de observación simultánea.

## **1.3. HIPÓTESIS**

Se supone que existe una justificación teórica al problema de falta de sensibilidad a ciertas fallas multiplicativas. Además, se supone que el conjunto de fallas para las cuales el residuo es insensible admite una caracterización matemática.

## **1.4. LÍMITES DEL ESTUDIO**

El contenido está limitado a dar a conocer los sistemas para los cuales el generador de residuos basado en métodos de observación es insensible. Se deja abierta la posibilidad de una investigación futura que pueda dar solución al problema.

## **1.5. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO**

El estudio debe hacerse ya que existen muchas aplicaciones donde se usan los métodos basados en observadores para detectar fallas. Se busca que los Ingenieros de diseño tomen en cuenta estas aclaraciones para evitar futuras pérdidas de tiempo, desperdicio de dinero e incluso accidentes.

Cabe mencionar que el uso de redundancia analítica pretende aumentar la seguridad de los sistemas. Sin embargo, el defecto puesto de manifiesto en este trabajo es una evidencia de puntos débiles que deben ser mejorados.

Esta investigación la debe realizar una persona que tenga los conocimientos básicos necesarios en ingeniería, matemáticas y procesos donde se usen los métodos basados en observadores y esté dispuesto a dedicar gran parte de su tiempo en análisis.

## 1.6. METODOLOGÍA

Enseguida se presentan los pasos propuestos a seguir para realizar la tesis:

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

## 1.7. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta sección se especifica la utilidad, en esta tesis en particular, de los libros y artículos que se encuentran en la bibliografía.

El artículo [3] me sirvió para conocer la detección y el aislamiento de fallas y como diseñar un generador de residuos.

El artículo [4] me sirvió para conocer los diferentes métodos usados para la generación de residuos, los cuales se especifican en el capítulo 2 de la tesis.

El artículo [5] me sirvió para conocer la construcción de los generadores de residuos robustos.



El artículo [6] me sirvió para conocer el trabajo desarrollado con la teoría de “FDI”.

El artículo [7] me sirvió para aprender sobre la parametrización de los observadores lineales, específicamente el conocimiento de las factorizaciones coprimas.

El artículo [8] me sirvió para aprender a diseñar la observación simultánea en sistemas lineales con lo que se pudo diseñar la  $Q(s)$  definida en los capítulos 2, 3 y 4 de la tesis.

El artículo [9] me sirvió para conocer la manera de separar el ruido del sistema en la gráfica del de una falla, haciendo un promedio.

El artículo [2] me sirvió como base para la construcción matemática de la tesis, además de que fue realizado durante la investigación realizada para la misma.

El artículo [10] me sirvió para tomar la definición de falla.

El libro [11] me sirvió para conocer los antecedentes del diagnóstico de fallas.

El libro [12] me sirvió para conocer el diseño de un generador de residuos y sus preliminares matemáticos.

El libro [13] me sirvió como para calcular la función de transferencia del sistema de primer orden, además como la base en los conocimientos de los sistemas de control.

El libro [1] me sirvió para conocer los antecedentes de las fallas multiplicativas, además para conocer la representación matemática de las fallas multiplicativas.

El libro [14] me sirvió para conocer el inicio de la redundancia analítica.

Los libros [15] y [16] me sirvieron para conocer el desarrollo de los filtros generadores de residuos.

Los libros [17] y [18] me sirvieron para conocer los diferentes métodos desarrollados para la detección de fallas.

El libro [19] me sirvió para conocer el método de estimación de parámetros

para detección de fallas.

El libro [20] me sirvió para conocer el método de ecuaciones de paridad para detección de fallas.

Los libros [21] y [22] me sirvieron para conocer métodos de aislamiento de fallas en los sensores usando generadores de residuos basados en observadores.

Los libros [23] y [24] me sirvieron para conocer los métodos de detección y aislamiento de fallas en los generadores de residuos basados en observadores.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. HISTORIA

Los sistemas modernos de control se han vuelto más complejos y los algoritmos de control cada vez más sofisticados. Como consecuencia, asuntos como la disponibilidad, el rendimiento, la confiabilidad, la seguridad de operación y la protección ambiental son más importantes tanto para sistemas con seguridad crítica como los reactores nucleares, las plantas químicas y las aeronaves como para sistemas avanzados como automóviles, trenes de tránsito rápido, etcétera.

Para los sistemas con seguridad crítica las consecuencias de las fallas pueden ser extremas, en términos de mortandad humana, impacto ambiental y pérdidas económicas. Por lo tanto hay una creciente necesidad de supervisar y diagnosticar fallas en línea para incrementar la confiabilidad de los mismos y así generar acciones preventivas y correctivas.

Para los sistemas no críticos el diagnóstico de fallas en línea se usa para mejorar la eficiencia, el mantenimiento, la disponibilidad y la confiabilidad de la planta.

Desde el comienzo de los 70's la investigación del diagnóstico de fallas ha ganado terreno mundial tanto en teoría como en aplicación. Este desarrollo ha sido especialmente estimulado por la tendencia de la automatización hacia mas complejidad y la creciente demanda de alta disponibilidad y seguridad en los sistemas de control.

Se dice que una falla es un cambio inesperado en el funcionamiento de un siste-

ma que afecta su desempeño. Una definición alternativa dice que una falla se define como la derivación de las propiedades características que conduce a la incapacidad para cumplir con el propósito al que se intenta llegar [10] .

Existe un sistema de monitoreo llamado sistema de diagnóstico de fallas que se usa para detectar fallas y diagnosticar su localización y significado en el sistema el cual, por lo general, consiste de las siguientes tareas:

1. Detección de fallas: Tomar una decisión binaria, si algo va mal o si todo esta bien.

2. Aislamiento de fallas: Determinar la localización de la falla, por ejemplo cual sensor o cual actuador está fallando.

3. Identificación de fallas: Estimar el tamaño, el tipo o la naturaleza de la falla.

De las tres tareas anteriores la detección y el aislamiento de las fallas son muy importantes para cualquier sistema práctico, sin embargo, no es necesariamente esencial que esté envuelta una acción de reconfiguración. Por lo tanto, el diagnóstico de fallas es considerado frecuentemente en la literatura como detección y aislamiento de fallas ("FDI").

## 2.2. DETECCIÓN DE FALLAS

En la práctica el método más usado para el diagnóstico de fallas es el monitoreo del nivel de una señal o la tendencia de una señal en particular para luego tomar una acción correctiva cuando esa señal alcanza un umbral determinado, desgraciadamente este método tiene sus desventajas; la primera es la posibilidad de que existan falsas alarmas cuando hay ruido en el sistema, variaciones en su entrada o un cambio en su punto de operación, la segunda es que una simple falla puede causar que muchas señales del sistema excedan sus límites y aparezcan como múltiples fallas, haciendo al aislamiento de fallas muy difícil.

Para eliminar este problema se pueden checar constantemente las señales del sistema, sin embargo se necesita un modelo matemático que entregue relaciones funcionales entre las diferentes señales del sistema.

Un enfoque tradicional en el diagnóstico de fallas es la redundancia de hardware que usa múltiples vías de sensores, actuadores, computadoras y software para medir o controlar una variable en particular, sin embargo, este enfoque trae problemas al tener que añadir equipo extra y costos de mantenimiento además de espacio adicional requerido en el sistema. Para solucionar este conflicto se creó la redundancia analítica que usa relaciones entre diversas variables medibles del proceso como son entradas, salidas y las combinaciones entre ellas; la diferencia resultante que se genera del chequeo constante de las diferentes variables se llama señal de residuo. El residuo debe ser cero cuando el sistema está trabajando en forma normal y diferente de cero cuando una falla ocurre en el sistema.

La redundancia analítica hace uso del modelo matemático del proceso monitoreado. El residuo normalmente se obtiene a través de la comparación de la señal medida en el sistema con la señal estimada del modelo matemático del mismo sistema.

El método basado en observadores detectores de fallas se puede definir, por lo tanto, como la determinación de las fallas de un sistema que se obtiene a partir de la comparación de las señales disponibles medidas del sistema con la información representada con anticipación del modelo matemático del mismo sistema. Los pasos que se siguen son la generación de residuos y su análisis [11].

La mayor ventaja de este enfoque es que no se necesitan componentes adicionales de hardware ya que el algoritmo del modelo basado en "FDI" se puede implementar con software en una computadora, además las mediciones necesarias para controlar el proceso son en su mayoría suficientes para el algoritmo de "FDI", solamente se necesitará más potencia y capacidad de almacenamiento en la computadora.



El desarrollo del diagnóstico de fallas basado en modelos comenzó al principio de los 70's. La idea de reemplazar la redundancia de hardware por redundancia analítica fue originada en el "MIT", donde se desarrollaron filtros generadores de residuos direccionales para "FDI" [14]. Este enfoque fue luego redefinido y a esta línea en particular se le conoce como el Filtro para Detección de fallas de Beard-Jones o Filtro de Detección de Fallas de Beard [15], [16].

El diagnóstico de fallas basado en modelos tiene dos etapas:

1. **Generador de Residuos:** Su propósito es generar una señal llamada residuo que indique que existe una falla usando información disponible de la entrada y la salida del sistema que está en monitoreo. El residuo debe ser normalmente cero o cercano a cero cuando no se presentan fallas, pero es completamente diferente de cero cuando ocurre una falla. Esto significa que el residuo es independiente de la entrada y la salida del sistema en condiciones ideales. Al algoritmo usado para generar el residuo se le llama generador de residuos.

2. **Toma de Decisiones:** Los residuos son examinados para detectar la falla y para esto se aplica una regla de decisión dependiendo del método que se quiera o necesite utilizar [17], [18].

Existen varios métodos para generar residuos, aunque los más conocidos son los siguientes:

- a) **Estimación de Parámetros:**

Este enfoque fue ilustrado por primera vez por Bakiotis, Raymond y Rault en 1979, luego por Geiger en 1982 [19]. Isermann y sus colaboradores siguieron esta línea de investigación desde el comienzo de los 80's.

En este enfoque los parámetros en el proceso no son conocidos o no son suficientemente conocidos, entonces se determinan por métodos de estimación de parámetros ya sea el método de error de ecuación o el método de error en la salida, midiendo las señales de entrada y de salida del sistema [4].

### b) Ecuaciones de paridad.

Este método fue propuesto por Mironovski entre 1979 y 1980, desgraciadamente este método no recibió atención suficiente por su disponibilidad limitada. No fué hasta sino hasta 1984 cuando Chow y Willsky propusieron independientemente este enfoque con diferentes versiones [20].

En este enfoque la estructura de los modelos debe ser conocida y debe coincidir con el proceso bastante bien. Los métodos de paridad para procesos dinámicos son el método de error de salida y el método de error de una ecuación polinómica [4].

### c) Método basado en observadores de estado:

Clark y sus colaboradores Fosth y Walton aplicaron por primera vez en 1975 los observadores de Luenberger para detección de fallas y luego se desarrollaron varios esquemas de aislamiento de fallas en los sensores [21], [22]. En 1987 Frank estableció la posición de los métodos basados en observadores para "FDI". Este método es el que será usado para el desarrollo de la tesis [23], [24].

## 2.3. OBSERVACIÓN PARA FDI

En el enfoque analítico de observadores la generación de residuos se hace estimando las salidas del proceso y usando la estimación de error como residuo. Para la tarea de detección de fallas es suficiente un filtro de Kalman, pero para la localización de las fallas se requieren conjuntos de residuos propiamente estructurados.

El concepto básico del generador de residuos basado en observadores se muestra en el diagrama de bloques de un observador de orden completo (Figura 2.1). Donde  $f$  es el vector de fallas que serán detectadas y que están representadas por funciones en el tiempo desconocidas y  $d$  es el vector de entradas desconocidas tales como perturbaciones, ruido, errores del modelo, etcétera a las cuales el sistema de detección debe ser inmune.

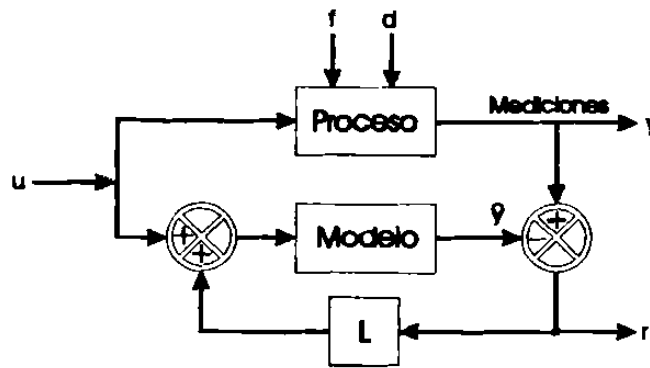


Figura 2.1: Observador; Filtro de Kalman.

El objetivo del generador de residuos es generar un vector  $r(t)$  tal que  $r(t)=0$  cuando  $f(t)=0$  y:

1.  $r(t) \neq 0$  cuando  $f(t) \neq 0$  para detección de fallas.
2.  $r_i(t) \neq 0$  cuando  $f_i(t) \neq 0$  para aislamiento de fallas.
3.  $\lim_{t \rightarrow \infty} [f(t) - r(t)] = 0$  para identificación de fallas.

donde  $f_i$  representa las fallas que serán aisladas y  $r_i$  representa a los conjuntos de residuos correspondientes.

La tarea de un observador para propósitos de control es reconstruir los estados del proceso. La tarea de los observadores de diagnóstico es reconstruir las salidas del proceso con el objetivo de crear redundancia.

Una manera directa de construir las salidas de los observadores es usando la relación entrada-salida que es descrita generalmente por una función de transferencia en el dominio de la frecuencia.

Como se definió anteriormente una falla es un cambio inesperado en el funcionamiento de un sistema que afecta su desempeño. Se sabe que los cambios en las variables del sistema se deben a cambios en la entrada del sistema, cambios en los parámetros del sistema y/o a cambios en la estructura del sistema. Para el desarrollo de la tesis se estudiarán solamente las fallas que se refieren al cambio de los

parámetros del sistema.

Considere un sistema lineal e invariante en el tiempo cuyas matrices son funciones de un vector de parámetros  $\theta$ . El vector  $\theta$  agrupa a todos los parámetros que eventualmente están sujetos a cambios, esto es:

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

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

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

De acuerdo con la definición de falla, esta será representada como un cambio en el vector de parámetros  $\Delta\theta$ . Si no hay fallas en el sistema entonces las matrices del sistema serán representadas por su valor nominal  $A(\theta_0)$ ,  $B(\theta_0)$ ,  $C(\theta_0)$ . Si existen fallas, las matrices del sistema cambiarán su valor nominal y serán representadas como sigue:

$$A(\theta) = A(\theta_0) + \Delta\theta; \quad B(\theta) = B(\theta_0) + \Delta\theta; \quad C(\theta) = C(\theta_0) + \Delta\theta$$

Una representación aditiva de las fallas se puede obtener como:

$$Ef = \frac{\partial A(\theta)}{\partial \theta} x + \frac{\partial B(\theta)}{\partial \theta} u; \quad (2.2a)$$

$$Ff_s = \frac{\partial C(\theta)}{\partial \theta} x \quad (2.2b)$$

Las ecuaciones en espacio de estados quedan como:

$$\dot{x}(\theta, t) = A(\theta_0)x(\theta, t) + B(\theta_0)u(t) + Ef, \quad x(0) = x_0 \quad (2.3a)$$

$$y(\theta, t) = C(\theta_0)x(\theta, t) + Ff_s \quad (2.3b)$$

Los vectores de fallas aditivas  $f$  y  $f_s$  dependen no solo de los cambios de los parámetros, sino que también del estado y de la entrada del sistema. Esto ocasiona acoplamiento entre los cambios en los parámetros  $\Delta\theta_i$ , y a su vez dificulta el proceso de localización de las fallas mediante métodos lineales. El diagrama de bloques para fallas aditivas puede verse en la figura (2.2).

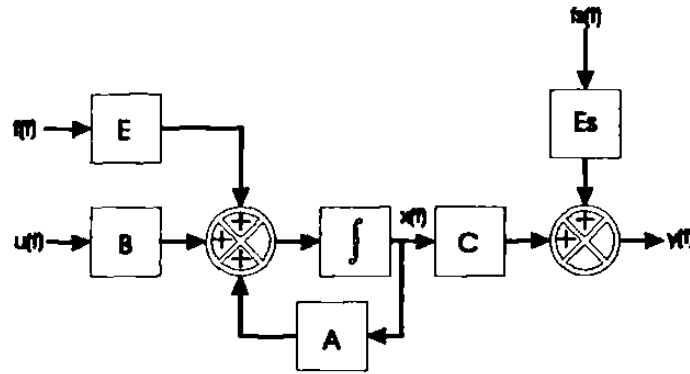


Figura 2.2: Diagrama de bloques de la representación aditiva de fallas.

Note que la representación aditiva de fallas es, en general, artificial y solamente en casos especiales se presenta de manera natural.

Para definir una falla multiplicativa partimos del supuesto que existe una falla (o un grupo de fallas) presente en el sistema. Entonces el modelo se representa por:

$$\dot{x}(t) = A(\theta + \Delta\theta)x(t) + B(\theta + \Delta\theta)u(t) \quad (2.4a)$$

$$y(t) = C(\theta + \Delta\theta)x(t) \quad (2.4b)$$

Debido a que el vector de parámetros  $\theta$  puede estar involucrado de manera no lineal en el sistema dentro de las matrices A, B y C, no es posible separar siempre de manera explícita el vector de fallas  $\Delta\theta$  del sistema en la ecuación (2.4). Sin embargo se puede aplicar la expansión en series de Taylor a las matrices involucradas para hacer la separación de las fallas.

Se dice que el sistema (2.4) es lineal con respecto a  $\theta$  si la expansión en series de Taylor de las matrices  $A(\theta)$ ,  $B(\theta)$  y  $C(\theta)$  es determinada tan solo por términos lineales.

Suponiendo que el sistema (2.4) es lineal con respecto a  $\theta$ , entonces el sistema posee la siguiente representación equivalente:

$$\dot{x}(t) = A(\theta_0)x(t) + B(\theta_0)u(t) + E(x, u)\Delta\theta \quad (2.5a)$$

$$y(t) = C(\theta_0)x(t) + F(x)\Delta\theta \quad (2.5b)$$

donde:

$$E(x, u) = \left[ \frac{\partial A(\theta)}{\partial \theta_1} x + \frac{\partial B(\theta)}{\partial \theta_1} u \quad \dots \quad \frac{\partial A(\theta)}{\partial \theta_n} x + \frac{\partial B(\theta)}{\partial \theta_n} u \right] \quad (2.6)$$

$$F(x) = \left[ \frac{\partial C(\theta)}{\partial \theta_1} x \quad \dots \quad \frac{\partial C(\theta)}{\partial \theta_n} x \right] \quad (2.7)$$

El vector de falla  $\Delta\theta$  junto con la matriz de distribución de fallas  $E(x,u)$  son la representación multiplicativa de fallas del sistema (2.4). Este nombre proviene del hecho de que las fallas  $\Delta\theta$  estén multiplicando directamente al vector de estado o a la entrada. Un diagrama de bloques con la representación multiplicativa de fallas se puede ver en la figura (2.3). Cuando los parámetros del sistema (2.6) actúan de manera no lineal, la representación hecha es solamente una aproximación de la realidad.

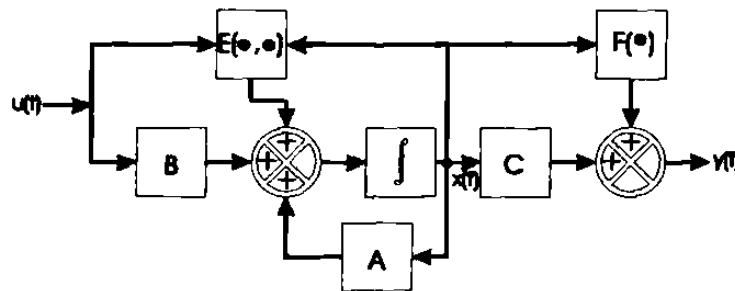


Figura 2.3: Diagrama de bloques de la representación multiplicativa de fallas.

La representación multiplicativa de las fallas es más natural, ya que las fallas multiplicativas reflejan directamente los cambios en los parámetros.

Hay algunas diferencias significativas entre las fallas aditivas y las fallas multiplicativas. Una falla multiplicativa puede influenciar la estructura del sistema mientras que una falla aditiva no causa ningún cambio en el sistema. Otra propiedad de los sistemas con fallas multiplicativas es la relación no lineal y la pérdida del principio de superposición, por ejemplo, la influencia de dos fallas multiplicativas pueden ser diferentes a la suma de la influencia de cada falla.

### 2.3.1. REPRESENTACIÓN MEDIANTE FACTORIZACIONES DEL SISTEMA Y DEL OBSERVADOR

La representación entrada-salida del sistema (2.1) esta dada por:

$$y(s) = G(s)u(s) \quad (2.8)$$

donde  $G(s)$  es la función de transferencia o matriz de transferencia del sistema (2.1) que se obtiene al usar Transformadas de Laplace y se relaciona con la representación de estado como sigue:

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B \quad (2.9)$$

Usando el enfoque de factorizaciones coprimas [7] el sistema se puede representar de la siguiente manera:

$$G(s) = N(s)M^{-1}(s) = \hat{M}^{-1}(s)\hat{N}(s) \quad (2.10)$$

donde  $M(s)$ ,  $N(s)$ ,  $\hat{M}(s)$  y  $\hat{N}(s) \in RH_\infty$  son las factorizaciones coprimas derecha e izquierda de la función de transferencia (2.9) respectivamente cuyo cálculo se encuentra en el Apéndice A.

Ahora se introduce un estado auxiliar  $\xi$  definido por:

$$\xi(s) = M^{-1}(s)u(s) \quad (2.11)$$

sustituyéndolo en la ecuación (2.8) queda:

$$M(s)\xi(s) = u(s) \quad (2.12a)$$

$$y(s) = N(s)\xi(s) \quad (2.12b)$$

Las ecuaciones (2.12) representan una nueva descripción del sistema.

Puesto que: 
$$x(s) = (sI - A)^{-1}Bu(s) \quad (2.13)$$

entonces, sustituyendo la ecuación (2.12a) en la ecuación anterior nos queda que

$$x(s) = (sI - A)^{-1}BM(s)\xi(s) \quad (2.14)$$

Se puede probar que la siguiente igualdad es válida:

$$(sI - A)^{-1}BM(s) = (sI - A_F)^{-1}BM^{-1}(s)M(s) = (sI - A_F)^{-1}B \quad (2.15)$$

con  $A_F$  estable (Apéndice A) esto es, con sus valores propios en el semiplano izquierdo del plano complejo.

A través de  $\widehat{J}(s)\xi(s)$  se puede estimar:

$$J(s) = J(sI - A_F)^{-1}B \in RH_\infty \quad (2.16)$$

Un observador se define mediante un sistema dinámico de la forma:

$$\eta(s) = F(s)u(s) + P(s)y(s) \quad (2.17)$$

Con lo cual las matrices de transferencia  $F(s)$  y  $P(s) \in RH_\infty$  deben cumplir las siguientes condiciones:

$$F(s)M(s) + P(s)N(s) = J(s) \quad (2.18)$$

El observador debe caracterizar el siguiente Lema:

**Lema 1** *Dado el sistema (2.8) como consecuencia se tienen 2 afirmaciones:*

*1. Las soluciones de la identidad (2.18) son:*

$$F(s) = J(s)Y(s) - Q(s)\hat{N}(s), \quad P(s) = J(s)X(s) + Q(s)\hat{M}(s) \quad (2.19)$$

*con  $Q(s) \in RH_\infty$ .*

*2. Para cada matriz de transferencia  $Q(s) \in RH_\infty$  de dimensión correspondiente se debe satisfacer la ecuación (2.19) donde  $F(s)$  y  $P(s)$  están definidas por una solución identidad (2.18). Siendo  $Y(s)$  y  $X(s) \in RH_\infty$  una solución de la identidad de Bezout llamada:*

$$Y(s)M(s) + X(s)N(s) = I \quad (2.20)$$



La identidad de Bezout, y los cálculos de  $Y(s)$  y  $X(s)$  están definidos en el Apéndice A.

Lo que se busca entonces es una matriz  $Q(s) \in RH_\infty$  para parametrizar el observador. Como se muestra enseguida, esta parametrización ayuda a simplificar el problema de la detección de error.

### 2.3.2. CONSTRUCCIÓN DEL GENERADOR DE RESIDUOS

Con la ayuda de los resultados anteriores ahora se construirá un generador de residuos.

Dado un generador de residuos de la forma

$$r(s) = F(s)u(s) + H(s)y(s) \quad (2.21)$$

donde  $F(s)$  y  $H(s)$  son matrices lineales, estables y  $\in RH_\infty$ , la señal generada  $r(s)$  cumple:

$$r(s) = G_r(s)f(s) \quad (2.22)$$

cuando  $G_r(s) \neq 0$  y  $\Delta_y(s) = 0$ ,

$$\Delta_y(s) = G_d(s)d(s) \quad (2.23)$$

donde  $d(s) \in \mathfrak{R}^k$  es el vector de entradas desconocidas y  $G_d(s) \in \mathfrak{R}^{m \times k}$  es una matriz de transferencia conocida, se define que:

$$H(s) = P(s) - P \quad (2.24)$$

donde  $P(s)$  es  $\in RH_\infty$  y  $P$  una matriz de dimensiones apropiadas y  $\text{rango}(P) = m$ , entonces:

$$r(s) = F(s)u(s) + P(s)y(s) - Py(s) \quad (2.25)$$

De la ecuación (2.21) podemos observar que el generador de residuos (2.25) es válido solamente cuando la variable:

$$\eta(s) \triangleq F(s)u(s) + P(s)y(s) \quad (2.26)$$

entrega un estimado de  $Py(s)$ .

Para una  $\hat{F}(s) = 0$ , y haciendo los cálculos necesarios entre las ecuaciones (2.8, 2.10 y 2.12) se obtiene:

$$Py(s) = PG(s)u(s) = PN(s)\xi(s) \quad (2.27)$$

Del Lema 1 es posible deducir que la variable  $\eta(s)$  entrega una estimación para  $Py(s)$  cuando son válidas las siguientes ecuaciones:

$$F(s) = PN(s)Y(s) - Q(s)\hat{N}(s) \quad (2.28)$$

$$P(s) = PN(s)X(s) + Q(s)\hat{M}(s) \quad (2.29)$$

Si sustituimos  $F(s)$  y  $P(s)$  en (2.25) se obtiene:

$$r(s) = Q(s)(\hat{M}(s)y(s) - \hat{N}(s)u(s)) + P(N(s)Y(s)u(s) + N(s)X(s)y(s) - y(s)) \quad (2.30)$$

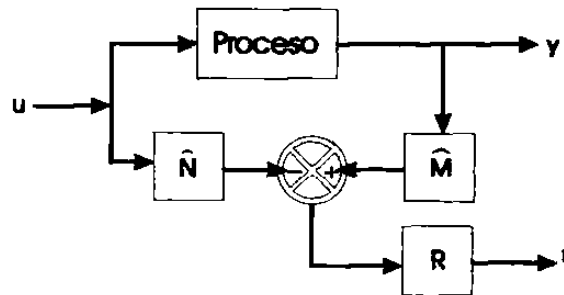


Figura 2.4: Estructura del generador de residuos

La aplicación de la identidad de Bezout (definida en el Apéndice A):

$$N(s)X(s) + \hat{Y}(s)\hat{M}(s) = I, \quad N(s)Y(s) = \hat{Y}(s)\hat{M}(s) \quad (2.31)$$

satisface a:

$$r(s) = (Q(s)\hat{M}(s) - P\hat{Y}(s)\hat{M}(s))y(s) + (P\hat{Y}(s)\hat{N}(s) - Q(s)\hat{N}(s))u(s) \quad (2.32)$$

con:

$$Q(s) = R(s) + P\hat{Y}(s), \quad R(s) \in RH_\infty \quad (2.33)$$

definido. Entonces el residuo queda:

$$r(s) = R(s)(\hat{M}(s)y(s) - \hat{N}(s)u(s)) \quad (2.34)$$

La ecuación (2.34) contiene la parametrización del generador de residuos. El cálculo de las matrices  $\hat{M}(s)$  y  $\hat{N}(s)$  está en el Apéndice A. Contrario a lo anterior, la matriz de transferencia  $R(s)$  puede escogerse de forma arbitraria, siempre y cuando sea  $\in RH_\infty$ .

Con diferentes  $R(s) \in RH_\infty$  se forman nuevos algoritmos para la ecuación (2.34). La estructura de esta clase de generadores de residuos se puede ver en la figura (2.4). Físicamente se puede ver al sistema  $R(s)$  como un post-filtro. La tarea consiste en extraer información de las fallas con el estimador  $(\hat{M}(s)y(s) - \hat{N}(s)u(s))$  y con esto se llega a fabricar al residuo.

### **3. SENSIBILIDAD A LAS FALLAS MULTIPLICATIVAS DE LOS GENERADORES DE RESIDUOS BASADOS EN OBSERVADORES**

#### **3.1. IDEA BÁSICA**

El enfoque de Detección y Aislamiento de Fallas (“FDI”) basado en observadores se ha asociado frecuentemente con las fallas aditivas, sin embargo, como se mencionó anteriormente, las fallas en un sistema físico son de naturaleza multiplicativa.

Es posible obtener las fallas aditivas mediante una redefinición de las fallas multiplicativas, pero no existe una relación de uno a uno entre ambos tipos de fallas ya que las fallas aditivas actúan como entradas al sistema, en cambio, las fallas multiplicativas actúan de manera bilineal en el sistema.

Se ha demostrado que existe un defecto importante en los generadores de residuos basados en observadores [2], esto se puede mostrar con resultados de observación simultánea, donde se observa como un generador de residuos es insensible a un conjunto específico de fallas.

Esta insensibilidad a algunas fallas multiplicativas de los generadores de residuos basados en observadores debe ser conocida para mejorar los métodos de detec-

ción de fallas.

Lo que se busca en esta tesis es la caracterización de las fallas que no pueden ser detectadas con los generadores de residuos basados en observadores, para así garantizar la confiabilidad de este método de detección de fallas.

### 3.2. FALTA DE DETECTABILIDAD DE FALLAS Y CÁLCULO DE SENSIBILIDAD

Se adopta la siguiente definición de detección de fallas:

**Definición 1** *Una falla  $\zeta_i$  (aditiva o multiplicativa) se dice detectable si el efecto de la falla  $\zeta_i$  produce cambios en la salida del sistema.*

En realidad, una falla puede ser detectada de un residuo específico sólo si ese residuo cambia con la falla.

Según la definición anterior se puede trabajar con fallas que son detectables, sin embargo, esto no significa que todos los residuos sean sensibles a la falla.

En esta tesis será analizada la sensibilidad de los residuos lineales basados en observadores con respecto a las fallas multiplicativas y con la ayuda de las factorizaciones coprimas.

Considere el residuo dado por (2.21) y suponga que existe una falla multiplicativa  $\Delta\theta$ , en el sistema. Esto quiere decir que las matrices del sistema. Esto significa que las matrices nominales  $A(\theta_0)$ ,  $B(\theta_0)$  y  $C(\theta_0)$  cambiarán su valor, quedando ahora representadas por el sistema con fallas multiplicativas  $A(\theta)$ ,  $B(\theta)$  y  $C(\theta)$ . Para facilitar la escritura de las ecuaciones el sistema con fallas se representará como:

$$\dot{x} = A_\theta x(t) + B_\theta u(t) \quad x(0) = x_0; \quad y = C_\theta x(t) \quad (3.1)$$

$$G_\theta(s) = C_\theta(sI - A_\theta)^{-1} B_\theta G_\theta(s) = N_\theta(s) M_\theta^{-1}(s) = \hat{M}_\theta^{-1}(s) \hat{N}_\theta(s) \quad (3.2)$$

El sistema nominal se representará como:

$$\dot{x} = A_0x(t) + B_0u(t) \quad x(0) = x_0; y = C_0x(t) \quad (3.3)$$

$$G_0(s) = C_0(sI - A_0)^{-1}B_0G_0(s) = N_0(s)M_0^{-1}(s) = \hat{M}_0^{-1}(s)\hat{N}_0(s) \quad (3.4)$$

Ahora se considerará un generador de residuos diseñado para el sistema nominal:

$$r(s) = R(s)(\hat{M}_0(s)y(s) - \hat{N}_0(s)u(s)) \quad (3.5)$$

donde  $R(s) = Q(s) - P\hat{Y}_0(s)$ . Entonces se dice que una falla multiplicativa  $\Delta\theta_i$  es detectable con respecto al generador de residuos (3.5) si este es diferente de cero cuando la falla multiplicativa también es diferente de cero.

**Teorema 1** *El generador de residuos (3.5) es insensible a la falla multiplicativa  $\Delta\theta_i$  si y sólo si se cumple la ecuación:*

$$T_0(s)A(s) + Q(s)B(s) = T_\theta(s) \quad (3.6)$$

por lo tanto:

$$Q(s) = [T_\theta(s) - T_0(s)A(s)]B^{-1}(s) \quad (3.7)$$

donde:

$$A(s) = Y_0(s)M_\theta(s) + X_0(s)N_\theta(s) \quad (3.8)$$

$$B(s) = -\hat{N}_0(s)M_\theta(s) + \hat{M}_0(s)N_\theta(s) \quad (3.9)$$

y

$$T_0(s) = PC_0(sI - A_{k0})^{-1}B_0 \quad (3.10)$$

$$T_\theta(s) = PC_\theta(sI - A_{k\theta})^{-1}B_\theta \quad (3.11)$$

donde  $A_{k\theta} = A_\theta - B_\theta K$  y  $A_{k0} = A_0 - B_0 K$

**Teorema 2** *El generador de residuos (3.5) es insensible a  $n$  fallas multiplicativas  $\Delta\theta_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  si y sólo si se cumple la ecuación:*

$$T_0(s)A_i(s) + Q(s)B_i(s) = T_i(s) \quad (3.12)$$

por lo tanto:

$$Q(s) = [T_i(s) - T_0(s)A_i(s)]B_i^{-1}(s) \quad (3.13)$$

donde:

$$A_i(s) = Y_0(s)M_i(s) + X_0(s)N_i(s) \quad (3.14)$$

$$B_i(s) = -\hat{N}_0(s)M_i(s) + \hat{M}_0(s)N_i(s) \quad (3.15)$$

y

$$T_i(s) = PC_i(sI - A_{ki})^{-1}B_i \quad (3.16)$$

$$T_i = PN_\theta(s) \quad (3.17)$$

Prueba:

Considere que el Teorema 1 es válido. Sustituyendo los valores de  $A(s)$  y  $B(s)$  resulta:

$$T_0(s)[Y_0(s)M_\theta(s) + X_0(s)N_\theta(s)] + Q_0[-\hat{N}_0(s)M_\theta(s) + \hat{M}_0(s)N_\theta(s)] = T_\theta(s) \quad (3.18)$$

o reordenando:

$$(T_0(s)Y_0(s) - Q_0(s)\hat{N}_0(s))M_\theta(s) + (T_0(s)X_0(s) + Q_0(s)\hat{M}_0(s))N_\theta(s) = T_\theta(s) \quad (3.19)$$

o reescrita como:

$$F_0(s)M_\theta(s) + P_0(s)N_\theta(s) = T_\theta(s) \quad (3.20)$$

Lo cual significa que el residuo basado en observadores para el sistema nominal  $A_0, B_0, C_0$  es también un observador para el sistema con falla  $A_\theta, B_\theta, C_\theta$ .

Suponga que el residuo basado en observadores es insensible a la falla  $\Delta\theta_i$  pero el Teorema 1 no se satisface. Con el objetivo de garantizar que el residuo basado en observadores es insensible a la falla, el residuo debe ser un observador para el sistema con fallas  $A_\theta, B_\theta, C_\theta$ . De acuerdo al Teorema 1, el residuo basado en observadores

es un observador para el sistema con fallas si y solo si la ecuación (3.20) se cumple, pero sustituyendo  $F(s)$  y  $P(s)$  nos queda que:

$$T_0(s)[Y_0(s)M_\theta(s) + X_0(s)N_\theta(s)] + Q_0[-\hat{N}_0(s)M_\theta(s) + \tilde{M}_0(s)N_\theta(s)] = T_\theta(s) \quad (3.21)$$

Si observamos las ecuaciones (3.8) y (3.9) notaremos que la ecuación (3.21) es una contradicción, porque es la condición de insensibilidad, la cual se asumió como no satisfactoria.



## **4. EVIDENCIA EXPERIMENTAL**

### **4.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO**

#### **4.1.1. HARDWARE**

##### **Drive**

El drive llamado PRD-2 es un control regenerativo de cuatro cuadrantes de media onda y fase simple. Se utilizan dos SCR conectados en paralelo, invertidos uno con respecto al otro para proporcionar corriente positiva o negativa al motor de CD.

El drive cambiará automáticamente el motor a generador o viceversa dependiendo del cuadrante en el que se esté trabajando. Es decir, si el motor gira en cierta dirección a una velocidad dada y se le ordena llegar a una posición contraria a la dirección de giro del motor, entonces el motor actuará como generador y bombeará corriente de regreso a la línea de CA para frenar al motor rápidamente hasta llegar a la velocidad cero. La velocidad y la dirección del giro del motor están determinadas por el voltaje en la terminal de entrada del comando de posición. La polaridad del voltaje determina la dirección del giro del motor y la magnitud del voltaje la determina la velocidad.

El drive está protegido contra corriente excesiva de sobrecarga debido a la respuesta rápida del circuito limitador de corriente del mismo drive. Además tiene protección contra corto circuito o tierras mal conectadas accidentalmente. Esta pro-

tección se debe a los fusibles de respuesta rápida insertados en la línea de entrada de CA.

Las especificaciones del drive PRD-2 se encuentran en la tabla (4.1).

Voltaje de entrada	115 VCA $\pm$ 10 V
Frecuencia de entrada	60 HZ (cambio ajustable a 50Hz)
Capacidad en caballos de potencia (HP)	$\frac{1}{6}$ a $\frac{2}{3}$ HP y 1.9 HP con motores
Voltaje de salida para la armadura	0 - 75 VCD
Voltaje de salida para el campo	100 VCD (convertible a 50 VCD)

Tabla 4.1: Especificaciones del drive PRD-2

#### Motor de Corriente Directa

El motor se alimenta con 100 VCD en el campo y con 0 a 75 VCD en la armadura para producir movimiento o paro del motor según se requiera.

El motor de CD es básicamente un transductor de par que convierte la energía eléctrica en energía mecánica. El par desarrollado en el eje del motor es directamente proporcional al flujo en el campo y a la corriente de armadura. La relación entre el par desarrollado, el flujo  $\Phi$  y la corriente  $i_a$  es:

$$T_m = K_m \Phi i_a \quad (4.1)$$

donde  $T_m$  es el par del motor (N\*m, lb\*ft, oz\*in),  $\Phi$  es el flujo magnético (Webers),  $i_a$  es la corriente de armadura (Amperes) y  $K_m$  es la constante de proporcionalidad.

Además del par desarrollado, cuando el conductor se mueve en un campo magnético se genera un voltaje en sus terminales. Este voltaje es la fuerza contraelectromotriz, la cual es proporcional a la velocidad del eje y tiene a oponerse al flujo de corriente. La relación entre la fuerza contraelectromotriz y la velocidad del eje es:

$$e_b = K_m \Phi \omega_m \quad (4.2)$$

donde  $e_b$  es la fuerza contraelectromotriz (Volts) y  $\omega_m$  es la velocidad del eje ( $\frac{rad}{seg}$ ) del motor. Las ecuaciones (4.1) y (4.2) son la base de operación del motor de corriente directa.

### Tarjeta de adquisición de datos

Se utiliza una tarjeta de adquisición de datos llamada NI 6024E.

La tarjeta NI 6024E tiene una velocidad de muestreo de  $200 \frac{kMuestras}{seg}$  un desempeño de 12 bits en 16 entradas analógicas simples. El bus de comunicación entre la computadora con la tarjeta es PCI, lo cual permite robustez y aplicaciones múltiples de la tarjeta de adquisición de datos.

Las especificaciones de la tarjeta NI 6024E se encuentran en la tabla (4.2) :

Número de canales	8 diferenciales o 16 sencillos
Velocidad de muestreo	$200 \frac{kMuestras}{seg}$
Rangos de las señales de entrada	$\pm 10 V$
Protección de sobre voltaje	$\pm 40 V$ encendido y $\pm 25 V$ apagado
Ancho de banda	500 kHz (convertible a 50 VCD)

Tabla 4.2: Especificaciones de la tarjeta NI 6024E

### Computadora

Se utilizará una computadora personal genérica marca Alaska con 40 GB de disco duro, 256 MB de memoria SDRAM, un procesador Intel Pentium 3 con una velocidad 966 MHz y un bus de transmisión de datos con una velocidad de 133 MHz. La computadora trabaja bajo Windows 98.

### 4.1.2. SOFTWARE

#### Matlab

Se utilizará la versión 5.3 de Matlab para hacer los cálculos de las ecuaciones necesarias y para hacer las simulaciones necesarias para llevar a cabo la tesis.

#### LabVIEW

Se utilizará la versión 6.0 del software LabVIEW de la compañía National Instruments para hacer el programa de adquisición de datos de la tarjeta y guardarlos en un archivo.

## 4.2. PLANIFICACIÓN DEL EXPERIMENTO

Se desea verificar experimentalmente la falta de detectabilidad de fallas.

Se implementará artificialmente una falla multiplicativa en el sistema monitoreado que simula un cambio del 50 % en la resistencia de armadura de un motor de corriente directa, utilizando el siguiente esquema:

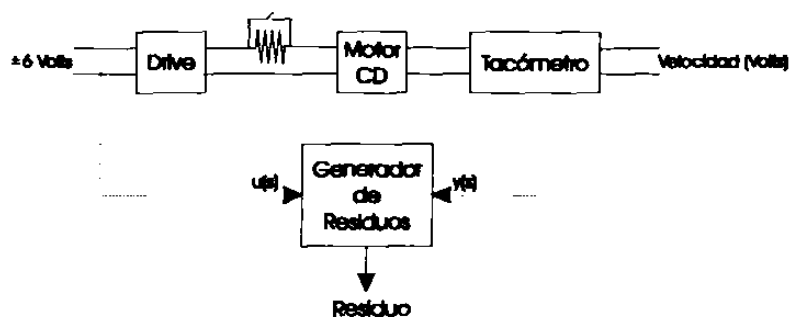


Figura 4.1: Simulación de una falla del 50 % en la resistencia de armadura.

Luego, por medio de la computadora, se construirá un generador de residuos que satisfaga las condiciones de no detectabilidad de la falla implementada para poder verificar el resultado.

### 4.2.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Se considera el modelo matemático de un motor de corriente directa de la figura que está conectado como se muestra en la figura (4.2) al cual se le controla la velocidad, siendo entonces un sistema de primer orden.

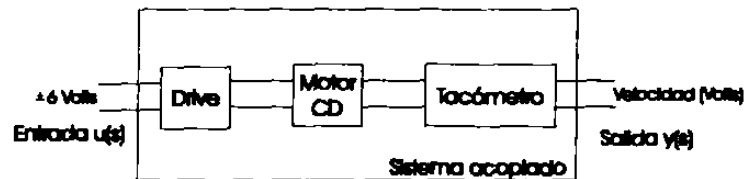


Figura 4.2: Motor de Corriente Directa.

Un drive que está alimentado por 120 volts de corriente alterna genera un voltaje de armadura variable que oscila entre los 0 volts de corriente directa (VCD) y los 130 VCD y un voltaje de campo fijo de 110 VCD. El drive es el encargado de controlar la velocidad del motor por medio de un potenciómetro de  $10k\Omega$  que al cambiar su resistencia proporciona un voltaje de referencia de entrada de -6 VCD a +6 VCD que hace girar al motor hacia un lado o hacia el otro, en 0 VCD no hay giro del motor. La flecha del motor está acoplada a un generador de corriente directa pequeño que hace las veces de un tacómetro, cuyo voltaje oscila entre 0 VCD cuando el motor está en reposo hasta los 1.23 VCD cuando el motor está a su máxima velocidad. La entrada de referencia de voltaje del drive y la salida del tacómetro están conectados a una tarjeta de adquisición de datos, para posteriormente poder manipular la información.

La función de transferencia del sistema en lazo abierto, cuyos cálculos se encuentran en el Apéndice B es:

$$G(s) = \frac{0,144}{0,17s + 1} \quad (4.3)$$

En espacio de estados las ecuaciones dinámicas del motor están dadas por:

$$\dot{x}(t) = [-5,9] x(t) + [1] u(t) \quad (4.4a)$$

$$y(t) = [0,847] x(t) \quad x(0) = x_0 \quad (4.4b)$$

### 4.3. SIMULACIÓN

Para la simulación se utilizará la función de transferencia del sistema nominal (B.8) para construir un generador de residuos de la forma (2.34). A continuación se describen los valores de las matrices que satisfacen la ecuación (2.33) y la ecuación (2.34), con un valor de  $P = 0.5$  y un valor de  $Q(s) = 7$ , estos valores serán calculados usando del Apéndice A con un valor de  $K = -0.1$ ,  $L = 7.2019$ , los polos de controlabilidad serán colocados en un valor de  $p_{0c} = -6$  y los polos de observabilidad serán colocados en un valor de  $p_{0o} = -12$ . El programa en Matlab para calcular los parámetros que vienen a continuación se encuentra en el Apéndice C.

$$\hat{M}(s) = \frac{s + 5,9}{s + 12} \quad (4.5)$$

$$\hat{Y}(s) = \frac{s + 12,1}{s + 6} \quad (4.6)$$

$$\hat{N}(s) = \frac{0,847}{s + 12} \quad (4.7)$$

$$R(s) = \frac{6,5s + 35,95}{s + 6} \quad (4.8)$$

por lo tanto el residuo es:

$$r(s) = \frac{6,5s^2 + 74,3s + 212,1}{s^2 + 18s + 72} y(s) - \frac{5,505s + 30,45}{s^2 + 18s + 72} u(s) \quad (4.9)$$

Se le aplico al motor un cambio en la resistencia de armadura de  $R_a = 92,6\Omega$  a una resistencia de falla de armadura  $R_{af} = 37,4\Omega$  en un tiempo  $t = 0.73$  segundos. La entrada se mantuvo constante en 3.3 VCD y la salida cambio de un voltaje de

0.9199 VCD a un voltaje de 0.9352 VCD en el tiempo de  $t = 0.73$  segundos. La gráfica de entrada-salida del sistema se puede ver en la figura (4.3). Se guardaron los datos en un archivo para poder manipularlos con Simulink. Se construyó el diagrama en Simulink que se muestra en la figura (4.4) de acuerdo con la figura (2.4). La gráfica

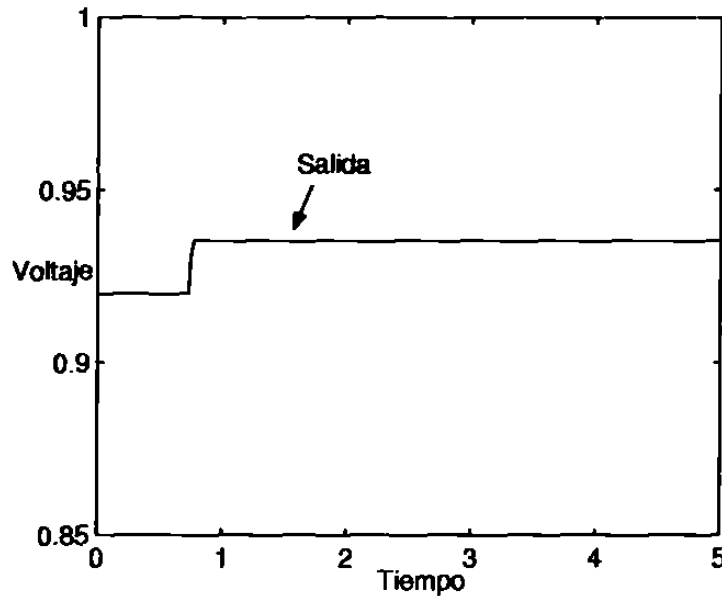


Figura 4.3: Gráfica de los datos de salida del sistema con falla.

del residuo se puede ver en la figura (4.5), en la cual además se puede observar que existe un pico fuera del margen definido en un tiempo  $t = 0.73$  segundos, esto quiere decir que el generador de residuos detectó la falla.

Sin embargo, para probar que existen valores de  $Q(s) \in RH_{\infty}$  con los cuales no se detecta la falla se utilizará el Teorema 1. Para utilizar este teorema se necesitó la función de transferencia del sistema con la falla permanente que es como sigue:

$$G_{\theta}(s) = \frac{0,847(1 + f)}{s + 5,9} \quad (4.10)$$

Como la falla es del 41 % la  $f = 0.41$ , por lo tanto la función de transferencia es:

$$G_{\theta}(s) = \frac{1,194}{s + 5,9} \quad (4.11)$$

Los datos que cumplen la ecuación (3.12) son los siguientes para una  $P = 1$ , una

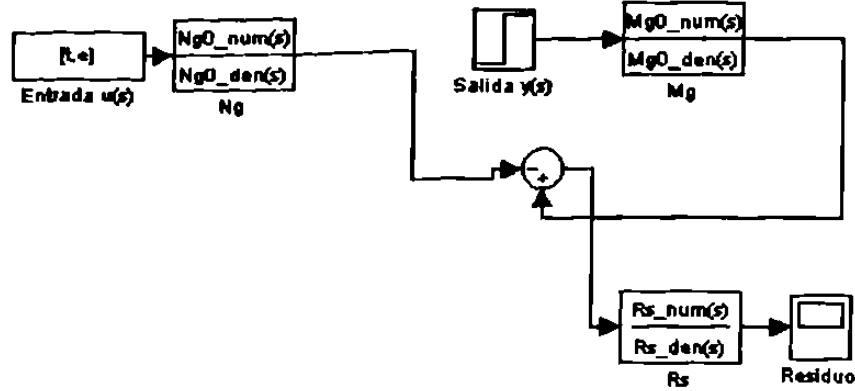


Figura 4.4: Estructura del generador de residuos en Simulink.

$K_0 = -0,1$ , una  $K_\theta = -0,1$ , una  $L_0 = 7,2019$  y una  $L_\theta = 5,1077$ :

$$T_0(s) = \frac{0,847}{s + 6} \quad (4.12)$$

$$T_\theta(s) = \frac{1,194}{s + 6} \quad (4.13)$$

$$A(s) = \frac{s^4 + 36s^3 + 468,3s^2 + 2597s + 5202}{s^4 + 36s^3 + 468s^2 + 2592s + 5184} \quad (4.14)$$

$$B(s) = \frac{0,3473s^3 + 8,3s^2 + 61,88s + 147,5}{s^4 + 36s^3 + 468s^2 + 2592s + 5184} \quad (4.15)$$

El valor de  $Q(s)$  se obtiene del despeje de la ecuación (3.12):

$$Q(s) = \frac{0,3473s^9 + 27,09s^8 + 924,9s^7 + 1,814e^4s^6 + 2,252e^5s^5 + 1,835e^6s^4 +}{0,3473s^9 + 24,97s^8 + 785,3s^7 + 1,419e^4s^6 + 1,623e^5s^5 + 1,221e^6s^4 +} \quad (4.16)$$

$$\frac{9,816e^6s^3 + 3,327e^7s^2 + 6,489e^7s + 5,552e^7}{6,046e^6s^3 + 1,901e^7s^2 + 3,449e^7s + 2,753e^7}$$

donde  $e = \times 10$ .

Ahora de la ecuación (2.33) despejando la  $R(s)$ , la  $\hat{Y}$  que se usa es la que se calcula del sistema nominal. entonces el valor de  $R(s)$  es:

$$R(s) = \frac{3,553e^{-15}s^9 + 2,274e^{-13}s^8 + 7,276e^{-12}s^7 - 2,98e^{-8}s^3 -}{0,3473s^{10} + 27,05s^9 + 935,1s^8 + 1,89e^4s^7 + 2,475e^5s^6 + 2,195e^6s^5 +} \quad (4.17)$$



$$\frac{5,96e^{-8}s^2 - 5,96e^{-8}s - 5,96e^{-8}}{1,337e^7s^4 + 5,529e^7s^3 + 1,486e^8s^2 + 2,345e^8s + 1,652e^8}$$

donde  $e = \times 10$ .

Se calcula el residuo de la ecuación (2.34) y se usa un diagrama en Simulink muy similar al de la figura (4.4), entonces la gráfica del generador de residuos se puede ver en la figura 4.6.

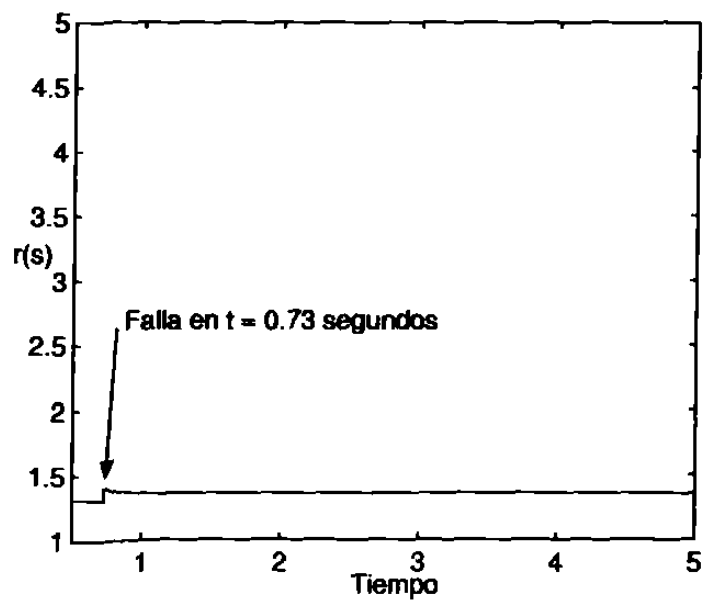


Figura 4.5: Residuo.

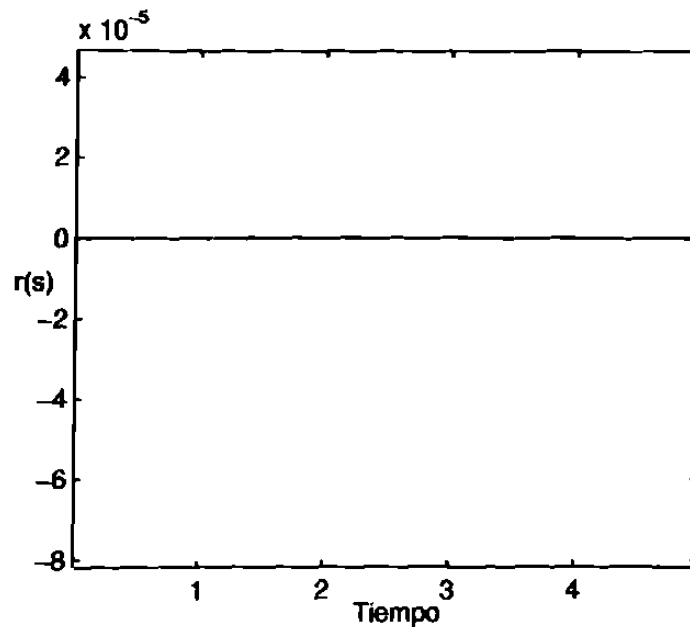


Figura 4.6: Residuo insensible a la falla.

## 4.4. RESULTADOS

Se puede observar la diferencia entre las gráficas (4.5) y (4.6). Se nota a simple vista que cuando se selecciona un valor de  $Q(s) \in RH_{\infty}$  arbitrario que no cumpla el Teorema 1 y genere una  $R(s) \in RH_{\infty}$  la falla en el sistema se puede detectar. Sin embargo si se calcula una  $Q(s) \in RH_{\infty}$  usando el Teorema 1 que genere una  $R(s) \in RH_{\infty}$ , entonces el residuo será insensible a la falla del sistema.

Se comprobaron dos resultados más en el transcurso de la realización de los experimentos. El primero es el siguiente:

Si se multiplica el valor calculado de  $R(s) \in RH_{\infty}$  por un valor  $\kappa > 0$ , este valor nuevo de  $R_{\kappa}(s) = R(s)\kappa$ , al ser utilizado para la construcción del generador de residuos, tampoco detectará la falla multiplicativa.

A continuación se generarán tres ejemplos, el primero para una  $\kappa = 0.03$ , el segundo para una  $\kappa = 52.7$  y el tercero para una  $\kappa = 4000$ , estos valores de  $\kappa$  se seleccionaron arbitrariamente.

El valor de  $R(s)$  para una  $\kappa = 0.03$  es:

$$R(s) = \frac{1,066e^{-16}s^9 + 6,821e^{-15}s^8 + 2,183e^{-13}s^7 - 8,941e^{-10}s^3 -}{0,3473s^{10} + 27,05s^9 + 935,1s^8 + 1,89e^4s^7 + 2,475e^5s^6 + 2,195e^6s^5 +} \quad (4.18)$$

$$\frac{1,788e^{-9}s^2 - 1,788e^{-9}s - 1,788e^{-9}}{1,337e^7s^4 + 5,529e^7s^3 + 1,486e^8s^2 + 2,345e^8s + 1,652e^8}$$

- donde  $e = x 10$ . La gráfica (4.7) es la de  $\kappa = 0.03$ .

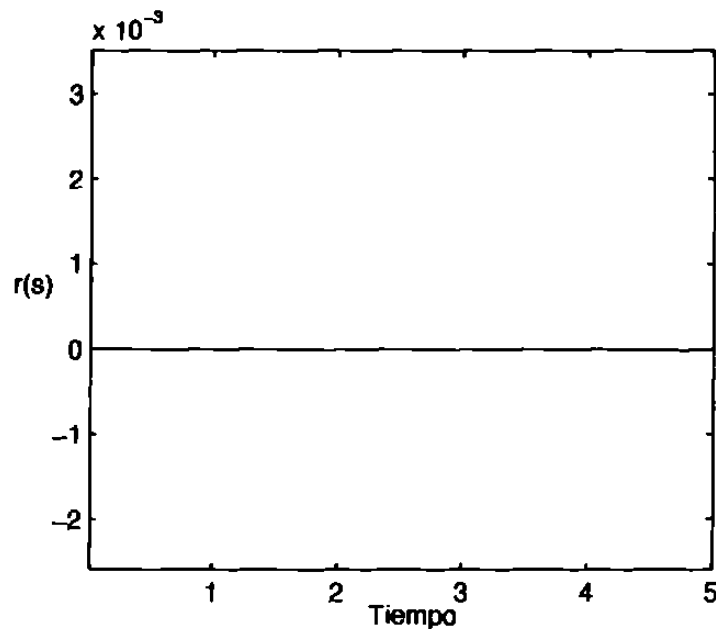


Figura 4.7: Residuo insensible a la falla multiplicado por  $\kappa = 0.03$

El valor de  $R(s)$  para una  $\kappa = 52.7$  es:

$$R(s) = \frac{1,872e^{-13}s^9 + 1,198e^{-11}s^8 + 3,834e^{-10}s^7 - 1,571e^{-6}s^3 -}{0,3473s^{10} + 27,05s^9 + 935,1s^8 + 1,89e^4s^7 + 2,475e^5s^6 + 2,195e^6s^5 +} \quad (4.19)$$

$$\frac{3,141e^{-6}s^2 - 3,141e^{-6}s - 3,141e^{-6}}{1,337e^7s^4 + 5,529e^7s^3 + 1,486e^8s^2 + 2,345e^8s + 1,652e^8}$$

donde  $e = x 10$ . La gráfica (4.8) es la de  $\kappa = 52.7$ .

El valor de  $R(s)$  para una  $\kappa = 4000$  es:

$$R(s) = \frac{1,421e^{-11}s^9 + 9,095e^{-10}s^8 + 2,91e^{-8}s^7 - 0,0001192s^3 -}{0,3473s^{10} + 27,05s^9 + 935,1s^8 + 1,89e^4s^7 + 2,475e^5s^6 + 2,195e^6s^5 +} \quad (4.20)$$

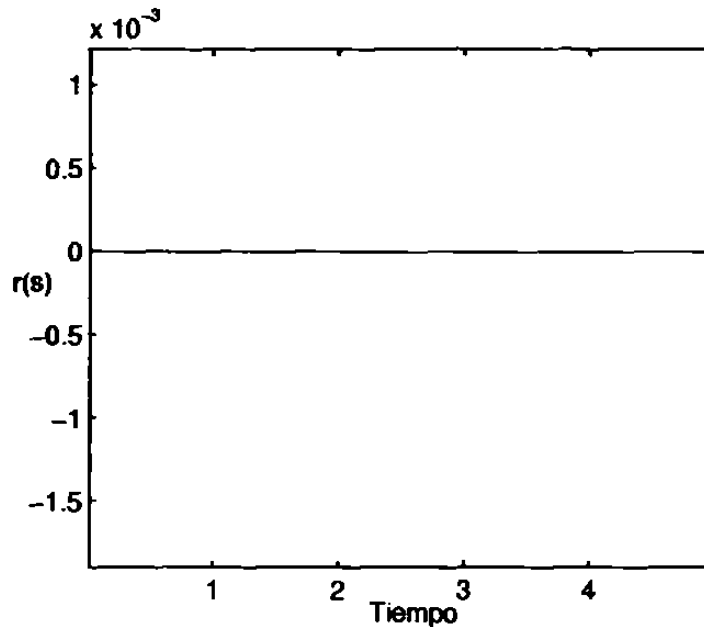


Figura 4.8: Residuo insensible a la falla multiplicado por  $\kappa = 52.7$

$$\frac{0,0002384s^2 - 0,0002384s - 0,0002384}{1,337e^7s^4 + 5,529e^7s^3 + 1,486e^8s^2 + 2,345e^8s + 1,652e^8}$$

donde  $e = \times 10$ . La gráfica (4.9) es la de  $\kappa = 4000$ .

El segundo resultado que se comprobó experimentalmente es que si se multiplica la falla multiplicativa por un factor  $\varsigma > 0$  y se utiliza el Teorema 1 para construir  $R(s)$ , el generador de residuos calculado será incapaz de detectar la falla multiplicativa. La  $R(s)$  utilizada es la de la ecuación (4.17). A continuación expongo tres ejemplos que prueban este hecho:

Para un valor  $\varsigma = 0.003$  la gráfica de entrada salida se puede ver en la figura (4.10), el voltaje inicial antes de la falla es 0.9199 Volts y el voltaje cuando aparece la falla es de 0.0028 Volts. La gráfica del residuo generado se puede ver en la figura (4.11).

Para un valor  $\varsigma = 18.5$  la gráfica de entrada salida se puede ver en la figura (4.12), el voltaje inicial antes de la falla es 0.9199 Volts y el voltaje cuando aparece la falla es de 17.3012 Volts. La gráfica del residuo generado se puede ver en la figura

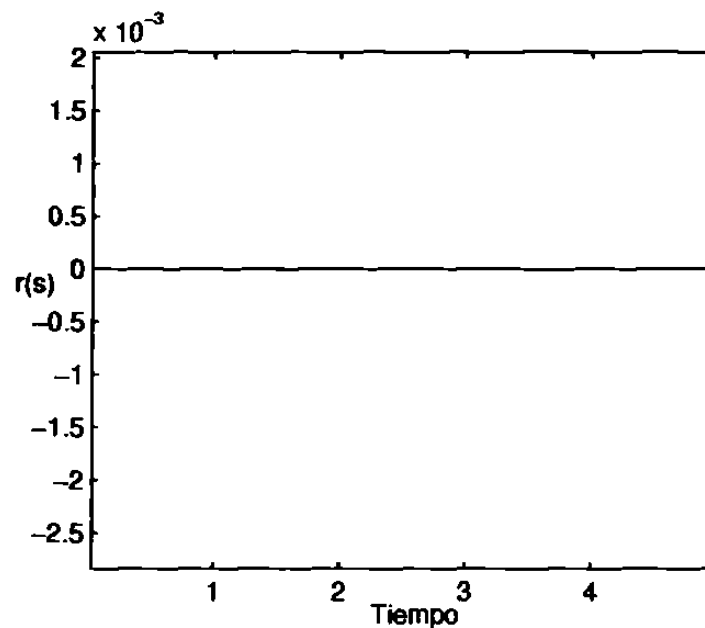


Figura 4.9: Residuo insensible a la falla multiplicado por  $\kappa = 4000$

(4.13).

Para un valor  $\varsigma = 500$  la gráfica de entrada salida se puede ver en la figura (4.14), el voltaje inicial antes de la falla es 0.9199 Volts y el voltaje cuando aparece la falla es de 467.6 Volts. La gráfica del residuo generado se puede ver en la figura (4.15).

Con el objetivo de minimizar el tamaño de la ecuación 4.17 se optó por eliminar los polos y los ceros manualmente, las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$A(s) = \frac{s^2 + 18s + 72,25}{s^2 + 18s + 72} \quad (4.21)$$

$$B(s) = \frac{0,3473s + 2,049}{s^2 + 18s + 72} \quad (4.22)$$

$$Q(s) = \frac{0,3473s^2 + 6,251s + 24,79}{0,3473s^2 + 4,133s + 12,29} \quad (4.23)$$

$$R(s) = \frac{-0,00053s^2 - 0,0033s + 0,0310}{0,3473s^3 + 6,217s^2 + 37,09s + 73,74} \quad (4.24)$$

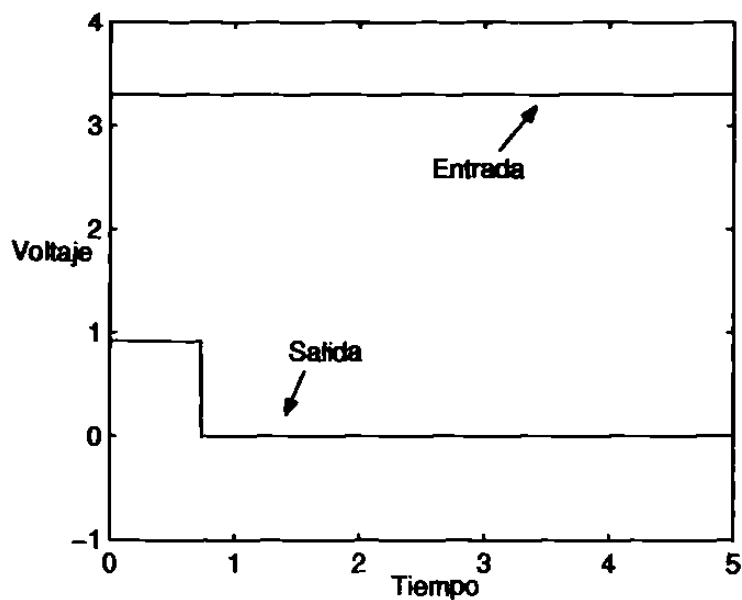


Figura 4.10: Falla multiplicada por  $\zeta = 0.003$

La gráfica del residuo se puede ver en la figura 4.16. De lo anterior se puede observar que eliminando la mayor parte o mejor dicho cancelando los polos y los ceros que se puedan cancelar al hacer las ecuaciones se puede detectar la falla. Dicho en otras palabras mientras menos polos y ceros cancelables tengan las ecuaciones más sensible será el post-filtro  $R(s)$  para detectar la falla y viceversa.

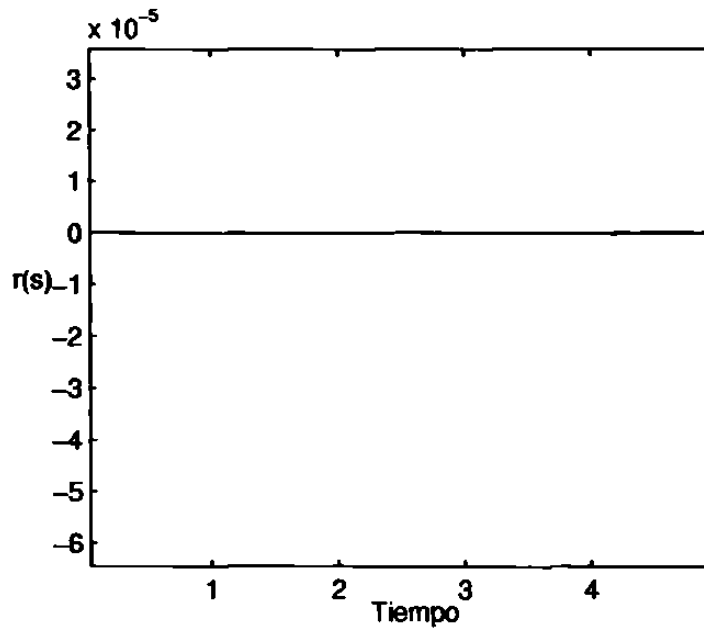


Figura 4.11: Residuo generado para una falla con  $\zeta = 0.003$

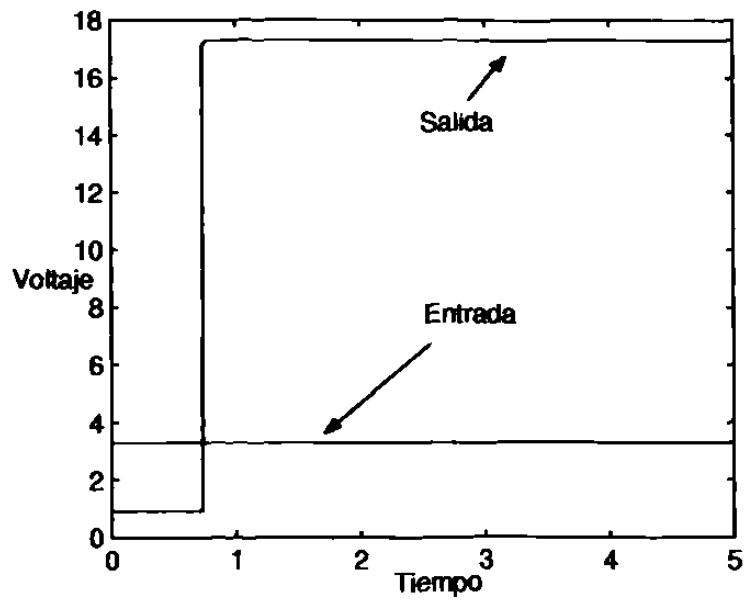


Figura 4.12: Falla multiplicada por  $\zeta = 18.5$

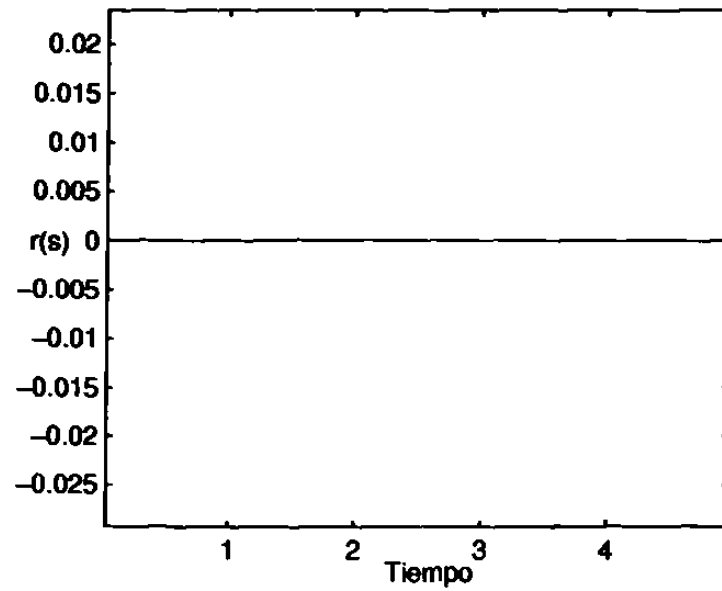


Figura 4.13: Residuo generado para una falla con  $\zeta = 18.5$

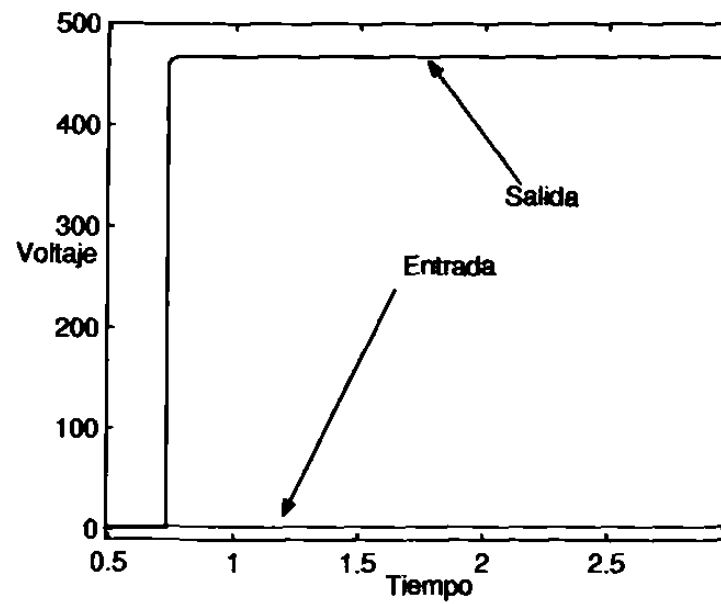


Figura 4.14: Falla multiplicada por  $\zeta = 500$



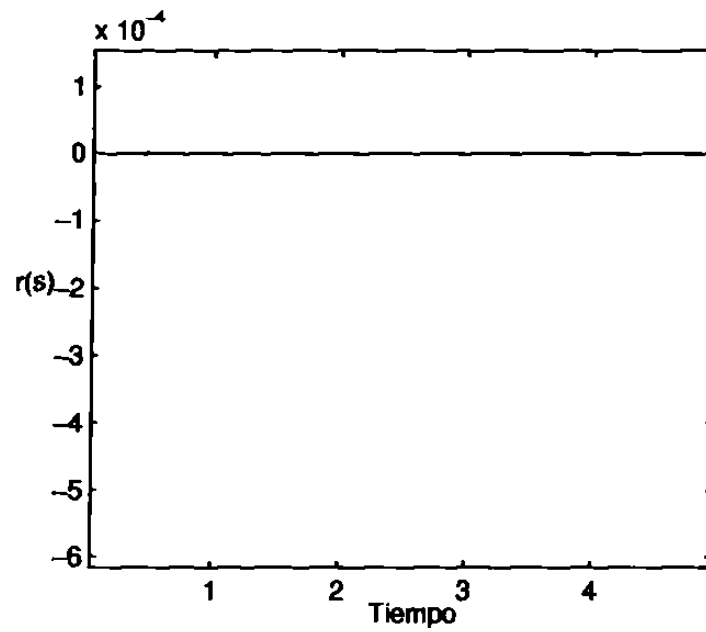


Figura 4.15: Residuo generado para una falla con  $\zeta = 500$

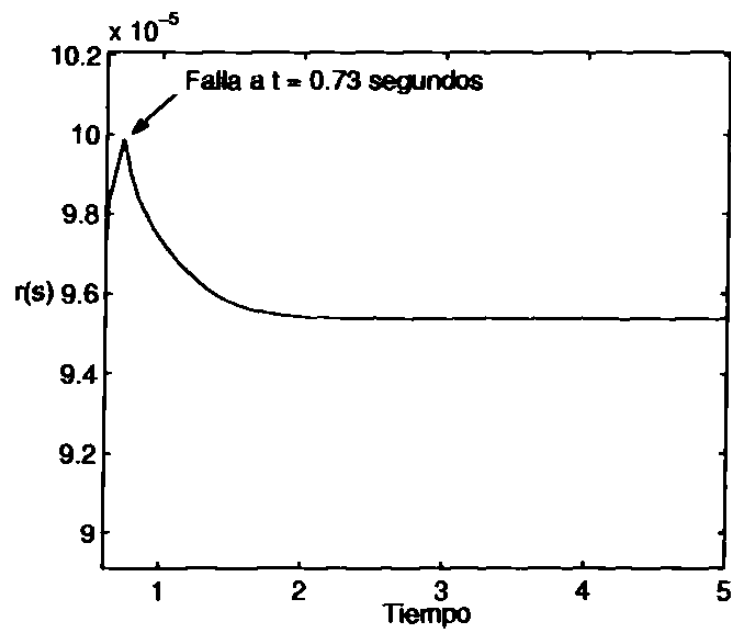


Figura 4.16: Residuo generado eliminando los polos y los ceros de las ecuaciones.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se comprobó experimentalmente que siempre que se utilice el Teorema 1 para encontrar el valor de  $Q(s) \in RH\infty$  el generador de residuos que se construye con el valor de  $R(s)$  calculado a partir de  $Q(s)$  será insensible a las fallas multiplicativas, siempre y cuando el valor de  $R(s)$  calculado sea también  $\in RH\infty$  además el cálculo del post-filtro  $R(s)$  debe hacerse sin eliminar los polos y los ceros cancelables, ya que, como se comprobó en el capítulo anterior, al no cancelar los polos y los ceros el post-filtro se vuelve insensible a las fallas, a esto también se le puede llamar una pérdida de información del post-filtro  $R(s)$  que lo hace incapaz de detectar las fallas.

También se comprobó experimentalmente que si se multiplica el valor calculado de  $R(s) \in RH\infty$ , cuyos polos y ceros no han sido cancelados, por un valor  $\kappa > 0$ , este valor  $R_\kappa(s)$  nuevo, al ser utilizado para la construcción del generador de residuos, tampoco detectará la falla multiplicativa.

Otro hecho que se comprobó experimentalmente fue que si se multiplica la falla multiplicativa por un factor  $\varsigma > 0$  y se utiliza el Teorema 1 para construir  $R(s)$ , el generador de residuos calculado será incapaz de detectar la falla multiplicativa ya que el post-filtro  $R(s)$  ha perdido información al ser calculado con el Teorema 1 y no haber eliminado los polos y los ceros en el cálculo.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. CONCLUSIONES

Se llegó a una caracterización matemática donde se puede observar experimentalmente que cuando se usa el Teorema 1 para calcular el valor de  $R(s)$ , el residuo generado es insensible a las fallas, al menos a las que se pudieron generar experimentalmente. Además con la ayuda de los experimentos se pudo comprobar también que cualquier valor positivo multiplicado por la falla multiplicativa o por el residuo ya generado con el Teorema 1 seguirá siendo insensible a las fallas.

### 6.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda como trabajos futuros encontrar la solución al problema de la insensibilidad a las fallas multiplicativas. Además se recomienda hacer varias pruebas con sistemas de cualquier tipo y de cualquier orden para comprobar si estos resultados se aplican a todos los sistemas o si se descarta alguno de ellos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alcorta García Efraín. Modellgetuetzte residuengenerierung fuer die diagnose von additiven und multiplicativen fehlern in dynamischen systemen. *VDI Verlag GmbH*, 1999.
- [2] Alcorta García Efraín y Salas Armendáriz Alethya Deydree. Detectability of multiplicative faults via observer-based residuals. *IASTED*, 2002.
- [3] Ding X. y Frank P.M. Frequency domain approach and threshold selector for robust model-based fault detection and isolation. *IMACS/IFAC Symp. FDSS, Raden Borden, Germany*, 1991.
- [4] Isermann R. On the applicability of model-based fault fetection for technical processes. *Control Eng. Practice*, Vol. 2:439–450, 1994.
- [5] Frank P.M. y Ding X. Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems. *Elsevier Science Ltd.*, Vol. 7:403–424, 1997.
- [6] Ding X. y Koeppen-Seliger Brigit Frank P.M. Current developments in the theory of fdi. *IFAC Symp. FDSSTP, Budapest, Hungary*, 2000.
- [7] Guo L. y Frank P.M. Ding X. Parametrization of linear observers and its application to observer design. *IEEE Transactions on Automatic Control*, August, 1994.
- [8] Darouach M. y Schaefers J. Yao Y. X. Simultaneous observation of linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, April, 1994.

- [9] Frantuzzi C. y Beghelli S. Simanu S. Diagnosis techniques for sensor faults of industrial processes. *IEEE Transactions on Automatic Control*, September, 1994.
- [10] Isermann R. Process fault detection based on modeling and estimation methods - a survey. *Automatica*, 1984.
- [11] Chen Jie y Patton Ron J. Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems. *Kluwer Academic Publishers*, 1999.
- [12] Ding Xianchun. Frequenzbereichsverfahren zur beobachtergestuetzten fehlerntdeckung. *VDI Verlag GmbH*, 1992.
- [13] Ogata Katsuhiko. Ingenieria de control moderna. *Prentice Hall*, 1998.
- [14] Beard R. V. Failure accommodation in linear systems through self-reorganization. *Rept. MVT-71-1. Man Vehicle Laboratory, Cambridge, Massachusetts*, 1971.
- [15] Jones H. L. Failure detection in linear systems ph.d. thesis. *Dept. of Aeronautics, M.I.T., Cambridge, Massachusetts*, 1973.
- [16] Massoumnia M. A. A geometric approach to the synthesis of failure detection filters. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 31, 839-846, 1986.
- [17] Willsky A. S. A survey of design methods for failure detection systems. *Automatica*, 12,601-611, 1976.
- [18] Basseville M. Detecting changes in signals and systems - a survey. *Automatica*, 24, 309-326, 1988.
- [19] Geiger G. Monitoring of an electrical driven pump using continuous-time parameter estimation methods. *IFAC - Symposium of Identification and System Parameter Estimation, Washington D. C., USA, Preprints Pergamon Press., Oxford*, 1982.

- [20] Chow F. Y. y Willsky A. S. Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 29, 1984.
- [21] Clark R. N. A simplified instrument detection scheme. *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst.*, 14, 558-563, 1978.
- [22] Clark R. N. Instrument fault detection. *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst.*, 14, 456-465, 1978.
- [23] Frank P. M. Advanced fault detection and isolation schemes using nolinear and robust observers. *10th IFAC-Congress, Muenchen*, 1987.
- [24] Frank P. M. Fault diagnosis in dynamic systems via state estimator - a survey. *System Fault Diagnostics, reliability and related knowledge-based approaches, Vol I*, 3598 pp, D. Reidel Publishing Company, 1987.

## LISTADO DE TABLAS

4.1. Especificaciones del drive PRD-2 . . . . .	28
4.2. Especificaciones del la tarjeta NI 6024E . . . . .	29

## LISTADO DE FIGURAS

2.1. Observador; Filtro de Kalman. . . . .	13
2.2. Diagrama de bloques de la representación aditiva de fallas. . . . .	15
2.3. Diagrama de bloques de la representación multiplicativa de fallas. . . . .	16
2.4. Estructura del generador de residuos . . . . .	20
4.1. Simulación de una falla del 50 % en la resistencia de armadura. . . . .	30
4.2. Motor de Corriente Directa. . . . .	31
4.3. Gráfica de los datos de salida del sistema con falla. . . . .	33
4.4. Estructura del generador de residuos en Simulink. . . . .	34
4.5. Residuo. . . . .	35
4.6. Residuo insensible a la falla. . . . .	36
4.7. Residuo insensible a la falla multiplicado por $\kappa = 0.03$ . . . . .	37
4.8. Residuo insensible a la falla multiplicado por $\kappa = 52.7$ . . . . .	38
4.9. Residuo insensible a la falla multiplicado por $\kappa = 4000$ . . . . .	39
4.10. Falla multiplicada por $\varsigma = 0.003$ . . . . .	40
4.11. Residuo generado para una falla con $\varsigma = 0.003$ . . . . .	41
4.12. Falla multiplicada por $\varsigma = 18.5$ . . . . .	41
4.13. Residuo generado para una falla con $\varsigma = 18.5$ . . . . .	42
4.14. Falla multiplicada por $\varsigma = 500$ . . . . .	42
4.15. Residuo generado para una falla con $\varsigma = 500$ . . . . .	43
4.16. Residuo generado eliminando los polos y los ceros de las ecuaciones. . . . .	43
B.1. Gráfica de respuesta del Motor de Corriente Directa . . . . .	55
B.2. Gráfica de respuesta escalada . . . . .	56



## GLOSARIO

**FALLA:** Es la derivación de las propiedades características que conduce a la incapacidad para cumplir con el propósito al que se intenta llegar.

**FALLA ADITIVA:** Es una falla que se encuentra en el sistema y se representa como una entrada externa.

**FALLA MULTIPLICATIVA:** Es una falla que se encuentra dentro del sistema multiplicando a los parámetros.

**FDI:** Siglas en inglés de Detección y Aislamiento de Fallas (Fault Detection and Isolation)

**MIT:** Siglas en inglés del Instituto Tecnológico de Massachusetts (Massachusetts Institute of Technology)

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

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

**RESIDUO:** Es la diferencia de la salida del sistema y la salida estimada del sistema.

## A. FACTORIZACIÓN DE MATRICES DE TRANSFERENCIA

Considere la matriz de transferencia:

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (\text{A.1})$$

Con  $(A,B)$  estables y  $(C,A)$  detectables. Existe otra forma de representar al sistema (A.1) es  $G(s)=(A,B,C,D)$ .

Las factorizaciones coprimas de  $G(s)$  son:

$$G(s) = N(s)M^{-1}(s) = \hat{M}^{-1}(s)\hat{N}(s) \quad (\text{A.2})$$

con:

$$M(s) \triangleq (A_K, B, K, I), \quad N(s) \triangleq (A_K, B, C_K, D) \in RH_\infty \quad (\text{A.3a})$$

$$\hat{M}(s) \triangleq (A_L, -L, C, I), \quad \hat{N}(s) \triangleq (A_L, B_L, C, D) \in RH_\infty \quad (\text{A.3b})$$

donde

$$A_K = A + BK, \quad A_L = A - LC \quad (\text{A.4a})$$

$$C_K = C + DK, \quad B_L = B - LD \quad (\text{A.4b})$$

$A_K$  y  $A_L$  son estables y las matrices  $K$  y  $L$  son elegibles.  $M(s)$  y  $N(s)$  son las factorizaciones coprimas por la derecha y  $\hat{M}(s)$  y  $\hat{N}(s)$  son las factorizaciones coprimas por la izquierda de (A.1).

$A_F = A + BF$ ;  $A_F$  es estable con una matriz  $F$  elegible.

Con los valores de las factorizaciones coprimas  $M$ ,  $N$ ,  $\hat{M}$  y  $\hat{N}$  se pueden calcular las matrices de transición  $X$ ,  $Y$ ,  $\hat{X}$  y  $\hat{Y}$  tales que:

$$Y(s)M(s) + X(s)N(s) = \hat{M}(s)\hat{Y}(s) + \hat{N}(s)\hat{X}(s) = I \quad (\text{A.5a})$$

Las cuales son calculadas por:

$$Y(s) \triangleq (A_L, B, -K, I), \quad \hat{Y}(s) \triangleq (A_K, L, C_K, I) \in RH_\infty \quad (\text{A.6a})$$

$$X(s) \triangleq (A_L, L, -K, 0), \quad \hat{X}(s) \triangleq (A_K, L, -K, 0) \in RH_\infty \quad (\text{A.6b})$$

Con esto se cumple la igualdad de Bezout:

$$\begin{bmatrix} Y(s) & X(s) \\ \hat{N}(s) & \hat{M}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M(s) & \hat{X}(s) \\ N(s) & \hat{Y}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

## B. CÁLCULO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Función de transferencia para el sistema de primer orden.

La función de transferencia de un sistema de primer orden tiene la forma:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (\text{B.1})$$

donde T es la constante de tiempo del motor y K es la ganancia estática del motor.

Se tomaron los valores de entrada y de salida del sistema acoplado para una entrada escalón de 0 VCD a 5 VCD, la gráfica de respuesta fue la siguiente:

Se puede observar en la figura B.1 que haciendo un promedio el valor inicial de voltaje es 0.52 VCD y el valor final de voltaje es 1.23 VCD. Se hace un escalamiento para que la gráfica comience en 0, quedando entonces como en la gráfica B.2 y el valor final en 0.72 Volts.:

Para encontrar la constante de tiempo T se necesita conocer el valor de tiempo donde inicia el escalón y el valor de tiempo donde la gráfica alcanza el 63,2% del valor final. La constante de tiempo será la resta entre ellas. El escalón inicia a un tiempo  $t = 5.8941$  y se alcanza el 63,2% del valor final en un tiempo  $t = 6.065$ , por lo tanto la constante de tiempo es  $T = 6.065 - 5.8941 = 0.17$  segundos.

Para encontrar la ganancia estática del motor K se utiliza el teorema del valor final que dice:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sY(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{K}{Ts + 1} u(s) \quad (\text{B.2})$$

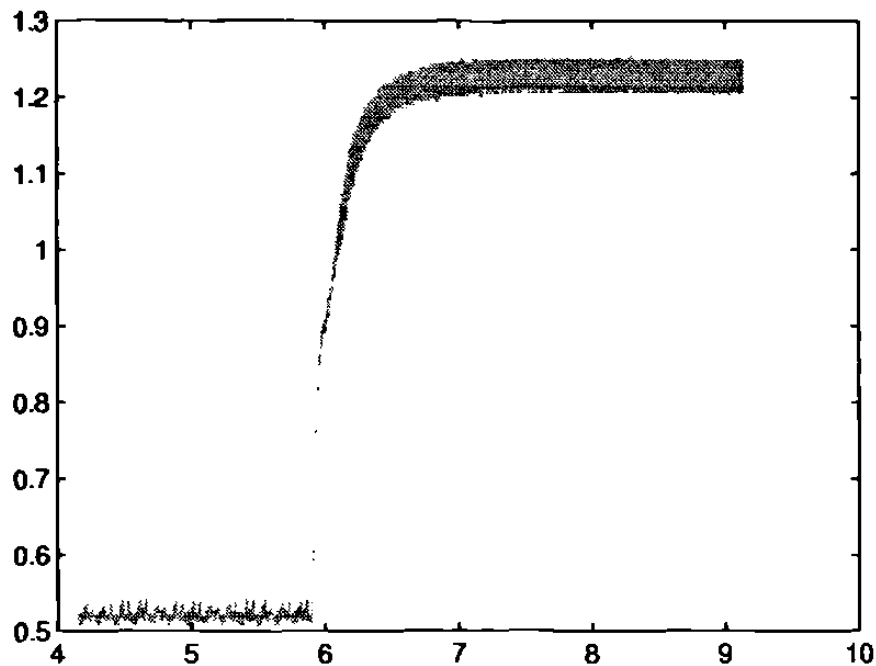


Figura B.1: Gráfica de respuesta del Motor de Corriente Directa

luego:

$$Y(s)_{final} = s \frac{K}{Ts + 1} u(s) \quad (B.3)$$

Como la entrada es de 5 volts, entonces  $u(s) = \frac{5}{s}$  y el valor final en la gráfica escalada es de  $Y(s) = 0.72$  y cualquier lugar donde haya  $s$  se sustituye por cero, entonces la ecuación queda como sigue:

$$0,72 = 5K \quad (B.4)$$

por lo tanto:

$$K = \frac{0,72}{5} = 0,144 \quad (B.5)$$

La función de transferencia queda como:

$$G(s) = \frac{0,144}{0,17s + 1} \quad (B.6)$$

Para convertir la función de transferencia a espacio de estados, ésta tiene que estar en la forma:

$$\frac{\beta_1}{s + \alpha_1} \quad (B.7)$$

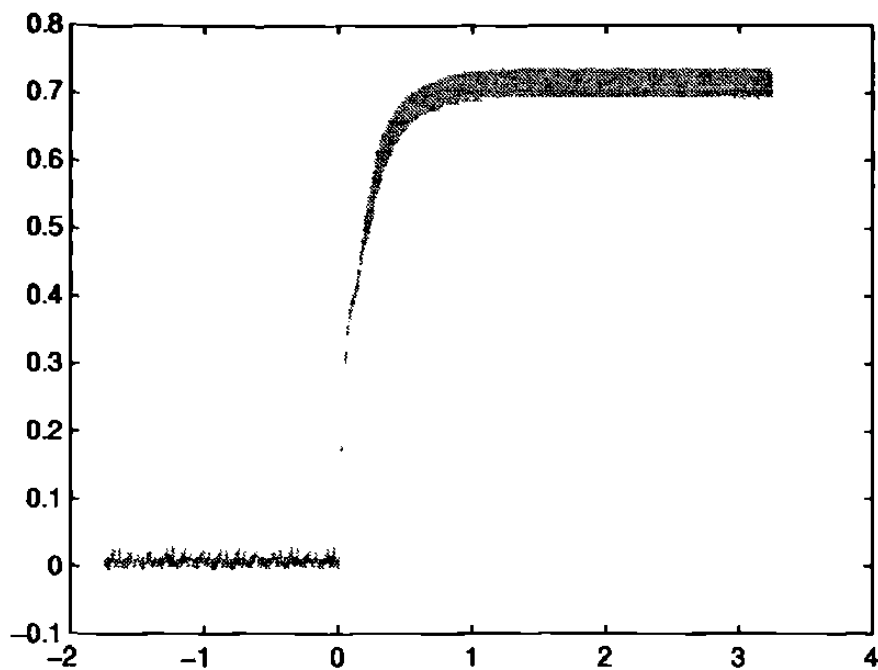


Figura B.2: Gráfica de respuesta escalada

Por lo tanto se divide la función de transferencia entre 0.1159 y la nueva función de transferencia es:

$$G(s) = \frac{0,847}{s + 5,9} \quad (\text{B.8})$$

Se usa la forma canónica controlable para convertir a espacio de estados:

$$\dot{x}(t) = [-\alpha_1] x(t) + [1] u(t) \quad (\text{B.9a})$$

$$y(t) = [\beta_1] x(t) \quad x(0) = x_0 \quad (\text{B.9b})$$

sustituyendo los valores el sistema en espacio de estados queda como:

$$\dot{x}(t) = [-5,9] x(t) + [1] u(t) \quad (\text{B.10a})$$

$$y(t) = [0,847] x(t) \quad x(0) = x_0 \quad (\text{B.10b})$$

## C. PROGRAMA EN MATLAB PARA CALCULAR LAS ECUACIONES DEL POST-FILTRO $R(s)$

Programa hecho para calcular las funciones de transferencia  $Q(s)$  y  $R(s)$  usando observación simultánea de sistemas lineales que cumplen con el Teorema 1.

Polos nuevos para controlabilidad del sistema nominal

$$p0c = [-6];$$

Polos nuevos para observabilidad del sistema nominal

$$p0o = [-12];$$

Polos nuevos para controlabilidad del sistema con fallas

$$p1c = [-6];$$

Polos nuevos para observabilidad del sistema con fallas

$$p1o = [-12];$$

Sistema nominal

$$A0 = [-5,9];$$

$$B0 = [1];$$

$$C0 = [0,847];$$

$$D0 = [0];$$

$G0_{ss} = ss(A0, B0, C0, D0);$

$G0 = tf(G0_{ss});$

$G0_{num} = G0.num1;$

$G0_{den} = G0.den1;$

El sistema es estable?

$e0 = eig(A0);$

El sistema es controlable?

$mc0 = ctrb(A0, B0);$

$ra0 = rank(mc0);$

$[na, nb] = size(A0);$

$ifna - ra0 = 0$

El sistema es no controlable

*end*

El sistema es observable?

$mo0 = obsv(A0, C0);$

$ro0 = rank(mo0);$

$ifna - ro0 = 0$

El sistema es no observable

*end*

Cambio de los polos del sistema para controlabilidad

$k0 = place(A0, B0, p0c);$

$K0 = -k0;$



Cambio de los polos del sistema para observabilidad

$l0 = place(A0', C0', p0o);$

$L0 = l0';$

Sistema con fallas

$f = 0,41;$

$A1 = [-5,9];$

$B1 = [1];$

$C1 = [0,847] * (1 + f);$

$D1 = [0];$

$G1ss = ss(A1, B1, C1, D1);$

$G1 = tf(G1ss);$

$G1_{num} = G1.num1;$

$G1_{den} = G1.den1;$

El sistema es estable?

$e1 = eig(A1);$

El sistema es controlable?

$mc1 = ctrb(A1, B1);$

$ra1 = rank(mc1);$

$[na1, nb1] = size(A1);$

$ifna1 - ra1 = 0$

El sistema es no controlable

*end*

El sistema es observable?

$m_{ol} = \text{obsv}(A1, C1);$

$r_{ol} = \text{rank}(m_{ol});$

$if\ n_{ol} - r_{ol} = 0$

El sistema es no observable

*end*

Cambio de los polos del sistema para controlabilidad

$k1 = \text{place}(A1, B1, p1c);$

$K1 = -k1;$

Cambio de los polos del sistema para observabilidad

$l1 = \text{place}(A1', C1', p1o);$

$L1 = l1';$

Calcula las matrices para diseñar el generador de residuos

$P = 1; \% \text{ Rank}(P) = m; \text{ donde } m \text{ es el tamaño del vector de salida}$

$s = \text{sym}('s');$

$I = \text{eye}(n_a);$

$AL0 = A0 - L0 * C0;$

$AK0 = A0 + B0 * K0;$

$BL0 = B0 - L0 * D0;$

$CK0 = C0 + D0 * K0;$

$AK1 = A1 + B1 * K1;$

$CK1 = C1 + D1 * K1;$

$$Mg0ss = ss(AL0, -L0, C0, 1);$$

$$Mg0 = tf(Mg0ss);$$

$$Ng0ss = ss(AL0, BL0, C0, D0);$$

$$Ng0 = tf(Ng0ss);$$

$$X0ss = ss(AL0, L0, -K0, 0);$$

$$X0 = tf(X0ss);$$

$$Y0ss = ss(AL0, B0, -K0, 1);$$

$$Y0 = tf(Y0ss);$$

$$Yg0ss = ss(AK0, L0, CK0, 1);$$

$$Yg0 = tf(Yg0ss);$$

$$M1ss = ss(AK1, B1, K1, 1);$$

$$M1 = tf(M1ss);$$

$$N1ss = ss(AK1, B1, CK1, D1);$$

$$N1 = tf(N1ss);$$

$$Mg0_{num} = Mg0.num1;$$

$$Mg0_{den} = Mg0.den1;$$

$$Ng0_{num} = Ng0.num1;$$

$$Ng0_{den} = Ng0.den1;$$

$$T0ss = ss(AK0, B0, P * C0, 0);$$

$$T0 = tf(T0ss);$$

$$T1ss = ss(AK1, B1, P * C1, 0);$$

$$T1 = tf(T1ss);$$

$$As = Y0 * M1 + X0 * N1;$$

$$Bs = -Ng0 * M1 + Mg0 * N1;$$

$$Qs = (T1 - T0 * As) * inv(Bs);$$

$$Rs = (Qs - P * Yg0)$$

$$Rs_{num} = Rs.num1;$$

$$Rs_{den} = Rs.den1;$$

## RESÚMEN AUTOBIOGRÁFICO

Mi nombre es Alethya Deydree Salas Armendáriz. Nací en Ciudad Camargo, Chihuahua el 8 de Enero de 1980. Mis padres son el Ing. Ernesto Alonso Salas Velo y Martha Elena Armendáriz Brito.

La preparatoria la hice en dos partes, el primer año en el CBTis #143 donde estudiaba la carrera de Técnico Programador Analista, el segundo año, por motivos familiares, lo hice en la Preparatoria # 4 de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Mis estudios de Licenciatura los realicé en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León donde obtuve el título de Ingeniero en Control y Computación.

Mientras realizaba mis estudios de licenciatura hice prácticas profesionales en el club de informática de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León donde era la encargada de soporte técnico. En las vacaciones hice prácticas profesionales en una empresa encargada de construir arneses eléctricos para los coches de reciente modelo, está localizada en la Ciudad de Fresnillo, Zacatecas, donde yo era auxiliar en el área de confiabilidad, mi trabajo consistía en comprobar que los arneses eléctricos de los coches estuvieran en perfecto estado y de acuerdo a las normas de la compañía, en caso contrario se rechazaba el producto.

El servicio social lo realicé en la empresa Tecnocontrol Industrial de México localizada en la ciudad de San Nicolás de los Garza Nuevo León, esta empresa se

encarga de la automatización de procesos industriales. Trabajé en el área de ingeniería donde era encargada de realizar los programas para los Controladores Lógicos Programables, de revisar los planos de conexiones de instrumentos y de realizar los manuales correspondientes al trabajo realizado.

En febrero del 2001 inicié mi trabajo en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica donde colaboré en un proyecto de investigación sobre fallas multiplicativas a cargo del Dr. Efraín Alcorta García, la investigación se continuó por tres meses en la Ciudad de Duisburg en Alemania y el proyecto se concluyó en Diciembre del 2002.

Esta tesis es requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Control.



