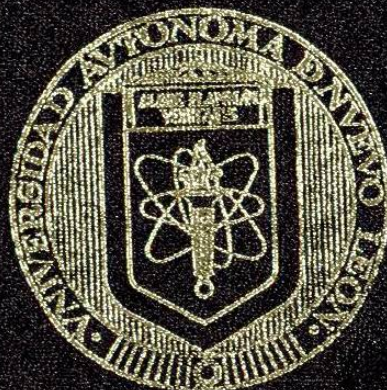


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA**

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**ANALISIS DE LA FALTA DE DETECTABILIDAD
DE FALLAS DE LOS METODOS DE DIAGNOSTICO
BASADOS EN OBSERVADORES DE ESTADO**

POR

ING. JUAN LUIS GAMEZ LOZANO

TESIS

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

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. JUNIO DE 2001

TM

Z5853

.M2

FIME

2001

G35



1020145445

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



ANALISIS DE LA FALTA DE DETECTABILIDAD
DE FALLAS DE LOS METODOS DE DIAGNOSTICO
BASADOS EN OBSERVADORES DE ESTADO

POR

ING. JUAN LUIS GAMEZ LOZANO

TESIS

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

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. JUNIO DE 2001

0150-04560

TH
ZS853
• M2
FINE
2001
G35

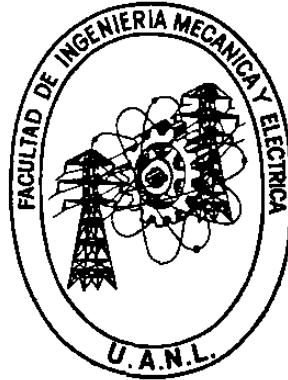


FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



ANÁLISIS DE LA FALTA DE DETECTABILIDAD DE FALLAS DE LOS
MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO BASADOS EN OBSERVADORES DE ESTADO

POR

ING. JUAN LUIS GÁMEZ LOZANO

TESIS

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

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L.

JUNIO DE 2001.

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 “Análisis de la Falta de Detectabilidad de Fallas de los Métodos de Diagnóstico Basados en Observadores de Estado”, realizada por el alumno Ing. Juan Luis Gámez Lozano, matrícula 652579 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Control.

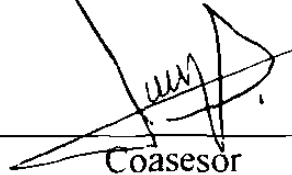
El Comité de Tesis



Asesor
Dr. Efraín Alcorta García



Coasesor
Dr. Cesar Elizondo González



Coasesor
Dr. Juan A. Rojas Estrada



Vs. Bo.
M. C. Roberto Villarreal Garza
División Estudios de Post-grado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León a 23 de mayo de 2001

PRÓLOGO

Esta tesis se escribió con la intención de mejorar los métodos de detección de fallas basados en observadores de estado, los cuales son quizás los más rápidos y los que cuentan con mayor grado de libertad en el diseño. Presenta un análisis del efecto de la observación simultánea y de su relación con la no detectabilidad de fallas en los métodos de diagnóstico basados en observadores. Se supone que el lector está bien informado respecto a los temas de sistemas lineales, detección de fallas y álgebra lineal.

Una pregunta natural que surge al considerar los diferentes algoritmos basados en observadores es una relacionada con la posibilidad de detectar una falla específica, es decir, la pregunta relacionada con la detectabilidad de fallas. Este tema ha sido considerado en la literatura en diferentes contextos, como por ejemplo: en el dominio de la frecuencia, en el dominio del tiempo, utilizando un enfoque geométrico, etc.

Recientemente fue reportado en la literatura un resultado que permite el diseño de un observador de estado de tal forma que esta pueda estimar el estado de más de un sistema. Este interesante resultado tiene consecuencias en los métodos de diagnóstico de fallas que están basados en observadores. Lo anterior puede ser clarificado de la siguiente manera: suponer que disponemos de un observador capaz de estimar el estado de dos sistemas. Considere el caso en el que uno de los sistemas cuyo estado puede ser estimado por el observador del correspondiente a un sistema en condiciones nominales y que el segundo de los sistemas representa al mismo sistema en condiciones de falla. La supervisión de observadores utilizando este observador fallará para el caso particular

antes mencionado o, dicho de otro modo, el algoritmo de diagnóstico permanece insensible a la falla antes mencionada.

Lo anterior significa que los métodos basados en observadores poseen un punto débil que no ha sido considerado con anterioridad. El problema considerado en este trabajo es doble. Primero, se pretende mostrar que efectivamente hay fallas que no pueden ser detectadas por un generador de residuos dado. Para esto son considerados tanto un ejemplo académico como las simulaciones de uno real. Segundo, es mostrada la manera de lograr detectar las fallas. Esto último es realizado solo vía simulaciones, sin embargo, se logra dar con esto un mayor grado de efectividad a los métodos de detección de fallas basados en observadores. Este último logro es la aportación más importante que impulsará, sin duda, a continuar con el estudio de este fenómeno de la observación simultánea enfocada a la detección de fallas.

ÍNDICE

Capítulo		Página
	SÍNTESIS	1
1 .	INTRODUCCIÓN	3
	1 . 1 Descripción del problema	3
	1 . 2 Objetivo de la tesis	4
	1 . 3 Hipótesis	4
	1 . 4 Límites de la tesis	4
	1 . 5 Justificación del estudio de la tesis	4
	1 . 6 Metodología	5
	1 . 7 Revisión bibliográfica	5
2 .	ANTECEDENTES	7
	2 . 1 Reconfiguración	7
	2 . 2 Generación residual	8
	2 . 3 Modelos lineales	10
	2 . 3.1 Modelo matemático	10
	2 . 3.2 Sistemas lineales	11
	2 . 3.3 Sistemas lineales variantes e invariantes en el tiempo	12
	2 . 3.4 Sistemas no lineales	12
	2 . 3.5 Linealización de sistemas no lineales	13
	2 . 4 Observadores de estado	14
	2 . 4.1 Problema dual	17

	2 . 4.2 Condición necesaria y suficiente para al observación de estado	19
	2 . 5 Matrices polinomiales racionales	19
3	OBSERVACIÓN SIMULTÁNEA	22
	3 . 1 Descripción del problema	22
	3 . 2 Resultados principales	26
	3 . 3 Conclusión	30
4	SOBRE LA FALTA DE DETECTABILIDAD	31
	4 . 1 La detectabilidad de fallas	31
	4 . 2 La falta de detectabilidad de fallas	33
5	CARACTERIZACIÓN DE LA FALTA DE DETECTABILIDAD DE FALLAS	35
	5 . 1 Introducción	35
	5 . 2 Ejemplo del diseño de un observador común	35
	5 . 3 Diseño de un observador en MATLAB	38
	5 . 4 Simulación de la generación residual	40
	5 . 5 Resultados de la generación residual en SIMULINK	41
6	EJEMPLO DE APLICACIÓN	45
	6 . 1 Introducción	45
	6 . 2 Modelo de un motor de c.d.	46
	6 . 3 Criterios para la simulación	49
	6 . 4 Diseño de un observador en MATLAB	50
	6 . 5 Generación de residuos	52
	6 . 6 Simulación de las pruebas	52
	6 . 6.1 Escenario E1	52
	6 . 6.2 Escenario E2	56
	6 . 6.3 Escenario E3	57

	6 . 6.4 Escenario E4	57
	6 . 6.5 Escenario E5	58
	6 . 6.6 Escenario E6	61
	6 . 7 Conclusiones	63
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
	7 . 1 Conclusiones	64
	7 . 2 Recomendaciones	65
	BIBLIOGRAFÍA	66
	LISTADO DE TABLAS	70
	LISTADO DE FIGURAS	71
	RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	73

SÍNTESIS

El propósito fundamental de este trabajo es exponer la problemática presente en los métodos de diagnóstico de fallas basados en observadores respecto a la falta de detectabilidad que se tiene para cierto tipo de fallas. Se pondrá en evidencia, a lo largo de esta tesis, que el problema está relacionado directamente con el fenómeno de la observación simultánea, para el cual existen condiciones necesarias y suficientes que serán estudiadas detenidamente.

Para el análisis del fenómeno de observación simultánea se desarrolló un programa computacional utilizando MATLAB. La finalidad de dicho programa es la de encontrar un observador común para dos sistemas dados, esto fue de gran importancia para la comprensión del problema de observación simultánea.

La solución al problema le dará a los métodos de detección de fallas que basan su funcionamiento en observadores, un grado de efectividad que no tenían antes y que aunado a la rapidez y grado de libertad que ofrecen por encima de otros métodos, se podrían convertir en una herramienta clave en la detección de fallas.

Dentro de los temas sobre los cuales fue necesario meditar para caracterizar el problema de no detectabilidad de fallas están aquellos relacionados con los observadores y en particular aquellos que giran alrededor de la observación simultánea y los generadores residuales. Ahora bien, una vez que todo esto quede comprendido se abordará el tema principal que es la caracterización de la falta de detectabilidad de fallas.

Para el análisis y estudio de las fallas no detectables se implementaron algunos programas computacionales que se diseñaron con la intención de simplificar operaciones tediosas y complicadas que podrían entorpecer y retardar la posibilidad de sacar conclusiones satisfactorias del tema. Por la misma causa se desarrollarán simulaciones en SIMULINK para deducir las conclusiones.

Me parece importante destacar que los programas computacionales en MATLAB y las simulaciones realizadas en SIMULINK servirán de apoyo para trabajos futuros relacionados con la búsqueda de la solución al problema general. Es por esta razón que se presentarán los programas completos para su fiel reproducción, incluyendo algunos comentarios.

1

INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

Todo sistema físico está sujeto a fallas en sus componentes. Estas fallas pueden causar desperfectos dañando el desempeño de un sistema. Por este motivo es necesario el establecer un método que permita la detección y corrección de fallas. Uno de los métodos más efectivos para el diagnóstico de fallas en sistemas de control es el basado en observadores, debido a que cuenta con más grados de libertad en el diseño y tienen una relativa rapidez para detectarlas. Un problema que presentan los métodos es la falta de detectabilidad de ciertas fallas al usar dichos métodos de diagnóstico. La falta de detectabilidad proviene del efecto de la observación simultánea. Este tema constituye el tema central de este trabajo, en lo que resta se dará evidencia de esta deficiencia de los métodos de diagnóstico basados en observadores así como posibles formas de corrección.

1.2 OBJETIVO DE LA TESIS.

Dar evidencia vía simulaciones del defecto de detectabilidad que presentan los métodos de diagnóstico de fallas basados en observadores.

1.3 HIPÓTESIS.

Es posible caracterizar matemáticamente el conjunto de fallas que no es detectable mediante métodos de diagnóstico basados en observadores de estado.

1.4 LÍMITES DE LA TESIS.

En los últimos 30 años fueron desarrollados un gran número de algoritmos para la detección de fallas. Estos pueden clasificarse, burdamente en 3 grandes grupos: En el primero los que utilizan redundancia física, en el segundo los que solo utilizan procesamiento de señales y en el tercero los que basan su funcionamiento en el conocimiento del sistema. El tercer grupo puede ser subdividido en tres subgrupos a la vez: el primero en espacio de paridad; el segundo en los métodos basados en estimación paramétrica y el tercero en los basados en observadores. Este último subgrupo será exclusivamente motivo de estudio para esta tesis. El estudio reportado en esta tesis abarca el dar evidencia vía simulaciones de la falta de detectabilidad de fallas mediante simulaciones, así como mostrar la viabilidad de posibles soluciones. Escapan al objetivo de la tesis la caracterización matemática de todas las fallas que no son detectables así como la solución sistemática a este problema.

1.5 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.

La detección de fallas normalmente es realizada en industrias donde las inversiones de capital son muy grandes, las ganancias muchas y las pérdidas enormes cuando se presentan fallas en los sistemas de control. Estas pueden ocasionar desde un pequeño

deterioro hasta el paro parcial o total de la planta, hecho que representa en veces la pérdida de cantidades de dinero muy considerables y esto sin mencionar la posible pérdida de vidas humanas. Por lo anterior, considero que cualquier aportación para elevar la confiabilidad de los algoritmos de diagnóstico de fallas que son basados en observadores, nos puede representar una aumento en la eficiencia de una planta y por consecuencia una disminución de pérdidas económicas y/o de vidas humanas.

1.6 METODOLOGÍA.

Enseguida se presentan los pasos propuestos a seguir para validar la hipótesis.

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.
5. Verificación experimental (usando un lazo de control de posición).
6. Discusión de resultados.
7. Elaboración de reporte.

1.7 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

El problema de detección de fallas recibió mucha atención en los pasados 30 años, como puede constatarse en la publicación [FRANK, 1996], así como las notas del curso FDI en sistemas lineales [ALCORTA, 1999].

Cabe hacer notar la importancia de los métodos basados en observadores de estado, los cuales ocupan un lugar importante tanto en los desarrollos teóricos como en las aplicaciones [ISERMANN, 1996]. La importancia de estos métodos en la fuente fundamental teórico.

Por otro lado, recientemente se dio a conocer un resultado interesante. Investigadores franceses mostraron que es posible que con un solo diseño de observador se pueda observar el estado de dos o más sistemas distintos. La condición que se satisface esta relacionada con la solución de una ecuación de Bezout formada a partir de los sistemas involucrados [YAO - ET. AL., 1995].

El problema sujeto a estudio es que si un observador puede servir para dos sistemas distintos puede ocurrir que un detector de fallas basado en observadores sea insensible a cierto tipo de fallas, en particular aquellas que al estar presentes hacen que se satisfagan las condiciones de observación simultánea. Este es el primer trabajo que pone de manifiesto este problema.

2

ANTECEDENTES

2.1 RECONFIGURACIÓN.

La naturaleza física de los componentes de un lazo de control es el motivo de que estos sean susceptibles a fallas. Estas fallas pueden hacer que un lazo de control degrade su desempeño pudiendo ocasionar pérdidas económicas hasta catástrofes. Debido a esto es conveniente contar con un mecanismo capaz de detectar y corregir las posibles fallas.

Un mecanismo empleado para la corrección de fallas es el de “reconfiguración”. La reconfiguración se realiza en dos partes: primero se determina la presencia de una falla en el sistema y su localización; segundo de acuerdo con la información disponible se realizan modificaciones a la ley de control para poder garantizar estabilidad, para recobrar el desempeño, (ver figura 2.1), etc.

El proceso de modificación de la ley de control esta basado en la configuración particular de cada sistema. Este no será tocado más en este trabajo. El diagnóstico de fallas se suele realizar tradicionalmente en dos partes: generación residual y evaluación de residuos.

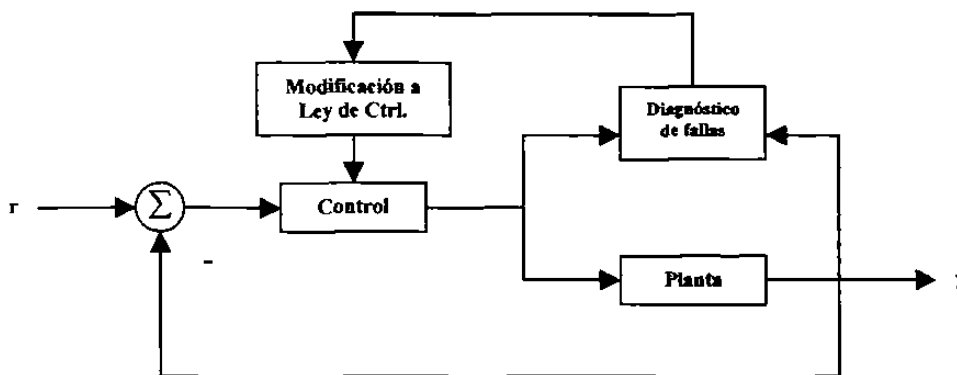


Figura 2.1 Diagrama que representa la reconfiguración.

Un residuo se define idealmente como una señal que solo depende de las fallas. Hay distintas formas de realizar los residuos. Dentro de los métodos de generación de residuos basados en los modelos se distinguen tres grupos: Espacio de paridad, estimación paramétrica y métodos basados en observadores de estado. Entre los últimos dos hay cierta equivalencia. Sin embargo, los métodos basados en estimación paramétrica y observadores son más bien complementarios [NCDF, 1999].

La evaluación de residuos consiste en extraer la información sobre la presencia de fallas. Esta información se manifiesta como cambio en el valor del residuo, una manera de evaluarlos consiste en calcular su norma y compararlos contra algún valor de umbral. El valor de umbral es necesario debido a que el valor del residuo nunca es perfecto.

2.2 GENERACIÓN RESIDUAL.

En esta sección se discutirá conceptualmente la manera de construir residuos basados en observadores. Considere un sistema lineal e invariante en el tiempo representado en la figura 2.2.

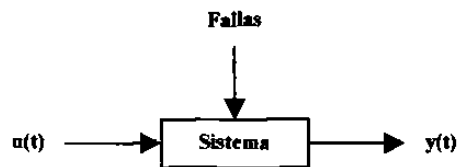


Figura 2.2 Representación de un sistema LTI.

Nótese que como se trata de un sistema lineal este puede escribirse como en la figura 2.3.

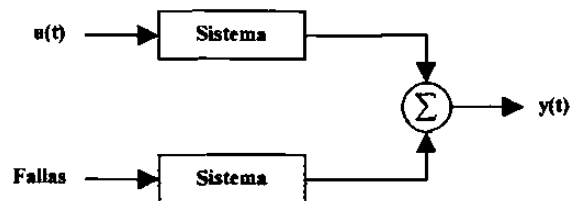


Figura 2.3 Representación alternativa de un sistema LTI.

Como se requiere que los residuos dependan solamente de las fallas es necesario compensar la parte correspondiente a la entrada $u(t)$. Una posible solución sería

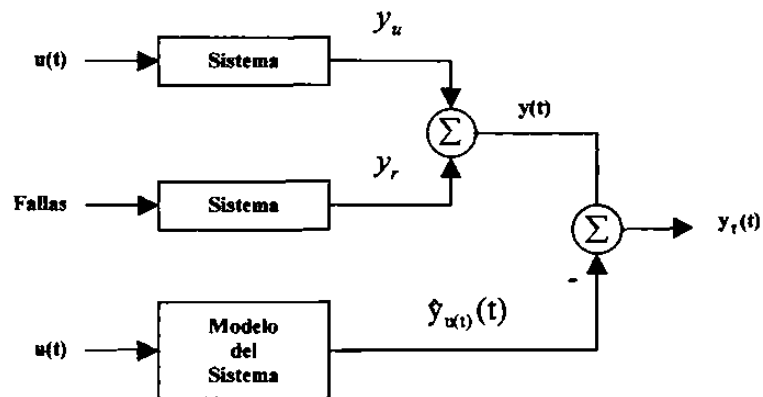


Figura 2.4 Compensación de la entrada $u(t)$ de un sistema LTI.

donde $y_r(t)$ representa al residuo.

Nótese que si el método del sistema fuera idéntico al sistema $y_r(t)$ depende solo de las fallas. Esta es la solución conocida como espacio de paridad.

El concepto de observador, en general, fue introducido por Luenberger en 1964 (figura 2.5) requiere que además del modelo del sistema se utilice una retroalimentación, es decir, un término corrector.

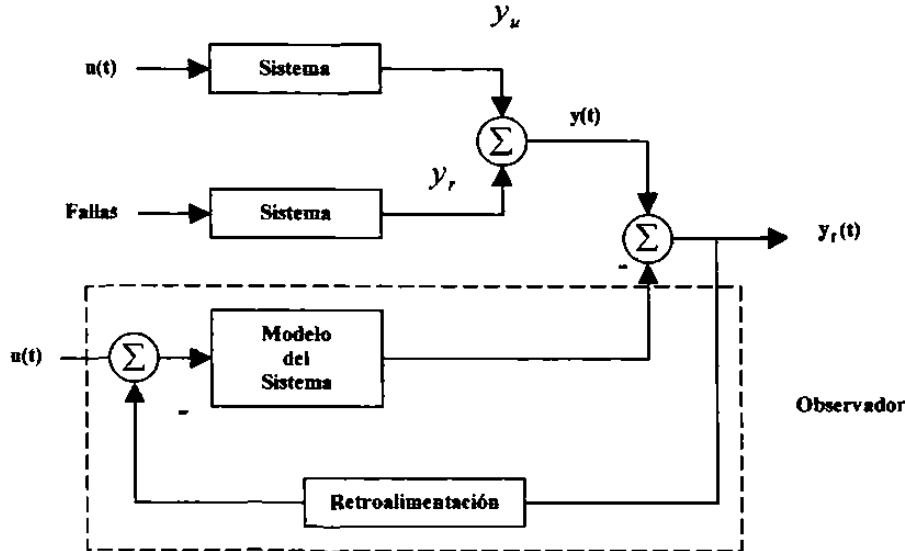


Figura 2.5 Observador de Luenberger.

Se puede demostrar que la ecuación del error relacionada con $r(t)$ depende dinámicamente de las fallas. El término en la retroalimentación, por otro lado, permite hacer algunos ajustes para desacoplar fallas, para reducir el efecto del ruido, etc.

En el resto del capítulo se presentan algunos antecedentes relacionados con los sistemas lineales, observadores de estado y con matrices polinomiales.

2.3 MODELOS LINEALES.

2.3.1 Modelo Matemático. Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión o, al menos, bastante bien. Tenga presente que un modelo matemático no es único para un sistema determinado. Un sistema puede representarse en muchas formas diferentes, por lo que puede tener muchos modelos matemáticos, dependiendo de cada perspectiva.

Los modelos matemáticos pueden adoptar muchas formas distintas. Dependiendo del sistema del que se trate y de las circunstancias específicas, un modelo matemático puede ser más conveniente que otros. Por ejemplo, en problemas de control óptimo, es provechoso usar representaciones de estados. En cambio para los análisis de la respuesta en frecuencia de sistemas lineales con una entrada y una salida invariantes en el tiempo, la representación mediante la función de transferencia puede ser más conveniente que cualquier otra. Una vez obtenido un modelo matemático de un sistema, se usan diversos recursos analíticos, así como computadoras, para estudiarlo y sintetizarlo.

Es posible mejorar un modelo matemático si se aumenta su complejidad. En algunos casos, se utilizan cientos de ecuaciones para describir un sistema completo. Sin embargo, en la obtención de un modelo matemático, debemos establecer un equilibrio entre la simplicidad del mismo y la precisión de los resultados del análisis. No obstante, si no se necesita una precisión extrema, es preferible obtener un modelo matemático adecuado para el problema que se considera.

Al obtener un modelo matemático razonablemente simplificado, a menudo resulta necesario ignorar ciertas propiedades físicas inherentes del sistema. En particular, si se pretende obtener un modelo matemático de parámetros concentrados lineal (es decir, uno en que se empleen ecuaciones diferenciales), siempre es necesario ignorar ciertas no linealidades y parámetros distribuidos (aquellos que producen ecuaciones diferenciales en derivadas parciales) que pueden estar presentes en el sistema dinámico. Si los efectos que estas propiedades ignoradas tienen sobre la respuesta son pequeños, se obtendrá un buen acuerdo entre los resultados del análisis de un modelo matemático y los resultados del estudio experimental del sistema físico.

2.3.2 Sistemas lineales. Un sistema se denomina lineal si se cumple el principio de superposición. Este principio establece que la respuesta producida por la aplicación simultánea de dos funciones de entradas diferentes es la suma de dos respuestas individuales. Por tanto, para el sistema lineal, la respuesta a varias entradas se calcula

tratando una entrada a la vez y sumando los resultados. Este principio permite desarrollar soluciones simples.

Si en una investigación experimental de un sistema dinámico son proporcionales la causa y el efecto, lo cual implica que se aplica el principio de superposición, el sistema se considera lineal.

2.3.3 Sistemas lineales invariantes y variantes en el tiempo. Los sistemas dinámicos formados por componentes de parámetros concentrados lineales invariantes en el tiempo se describen mediante ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo (de coeficientes constantes). Tales sistemas se denominan sistemas lineales invariantes con el tiempo (o lineales de coeficientes constantes). Los sistemas que se representan mediante ecuaciones diferenciales cuyos coeficientes son funciones del tiempo, se denominan sistemas lineales variantes con el tiempo. Un ejemplo de un sistema de control variante en el tiempo es un sistema de control de naves espaciales. (La masa de una nave espacial cambia debido al consumo de combustible).

2.3.4 Sistemas no lineales. Un sistema es no lineal si no se cumple el principio de superposición. Por tanto, para un sistema no lineal la respuesta a dos entradas no puede calcularse tratando cada una a la vez y sumando los resultados. Los siguientes son ejemplos de ecuaciones diferenciales no lineales:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + x = A \operatorname{sen}(wt)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + (x^2 - 1) \frac{dx}{dt} + x = 0$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} + x + x^3 = 0$$

Aunque muchas relaciones físicas se representan a menudo mediante ecuaciones lineales, en la mayor parte de los casos las relaciones reales no son verdaderamente lineales. De hecho, un estudio cuidadoso de los sistemas físicos revela que incluso los llamados “sistemas lineales” sólo lo son en rangos de operación limitados. En la práctica, muchos sistemas electromecánicos, hidráulicos, neumáticos, etc., involucran relaciones no lineales entre las variables. Por ejemplo, la salida de un componente puede saturarse para señales de entrada grandes. Puede haber una zona muerta que afecte las señales pequeñas. (La zona muerta de un componente es un rango pequeño de variaciones de entrada ante las cuales el componente es insensible). Puede ocurrir una no-linealidad de la ley cuadrática en algunos componentes. Por ejemplo, los amortiguadores que se utilizan en los sistemas físicos pueden ser lineales para operaciones a baja velocidad, pero pueden volverse no lineales para altas velocidades, y la fuerza de amortiguamiento puede hacerse proporcional al cuadrado de la velocidad de operación.

En general, los procedimientos para encontrar las soluciones a problemas que involucran tales sistemas no lineales son muy complicados. Debido a la dificultad matemática ligada a los sistemas no lineales, resulta necesario introducir los sistemas lineales “equivalentes” en lugar de los no lineales. Una vez que se aproxima un sistema no lineal mediante un modelo matemático lineal, pueden aplicarse varias herramientas lineales para análisis y diseño.

2.3.5 Linealización de sistemas no lineales. En la ingeniería de control, una operación normal del sistema puede ocurrir alrededor de un punto de equilibrio y las señales pueden considerarse señales pequeñas alrededor del equilibrio. (Debe señalarse que hay muchas excepciones a tal caso). Sin embargo, si el sistema opera alrededor de un punto de equilibrio y si las señales involucradas son pequeñas, es posible aproximar el sistema no lineal mediante un sistema lineal. Tal sistema lineal es equivalente al sistema no lineal, considerado dentro de un rango de operación limitado. Tal modelo linealizado (lineal e invariante en el tiempo) es muy importante en ingeniería de control.

En esta tesis se consideran exclusivamente los sistemas lineales o aquellos que hallan sido linealizados que sean invariantes en el tiempo. Considerar una familia de k sistemas lineales e invariantes en el tiempo representados por

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \quad (2.1)$$

$$y(t) = C_i x(t) + D_i u(t) \quad (2.2)$$

donde $i = 0, 1, \dots, k$ con $x \in \mathbb{R}^n$ el estado, $u \in \mathbb{R}^p$ el vector de entradas, $y \in \mathbb{R}^m$ el vector de salidas y A_i, B_i, C_i, D_i matrices de dimensiones apropiadas. La correspondiente representación entrada-salida de (2.1) y (2.2) esta dada por

$$y(s) = G_i(s) u(s). \quad (2.3)$$

2.4 OBSERVADORES DE ESTADO.

Un dispositivo (o programa de computadora) que estima u observa las variables de estado se llama *observador de estado*, o simplemente observador. La estimación de las variables de estado que no están disponibles para su retroalimentación por lo general se denomina observación. Si el observador de estado capta todas las variables de estado del sistema, sin importar si algunas están disponibles para su medición directa, se denomina *observador de estado de orden completo* (solamente los observadores de orden completo serán considerados en esta tesis). Hay ocasiones en las que un observador tal no es necesario, en las que sólo se requiere de la observación de las variables de estado que no se miden, pero no de aquellas que se miden directamente. Por ejemplo, dado que las variables de salida son observables y se relacionan en forma lineal con las variables de estado, no necesitamos observar todas las variables de estado, sino sólo las $n - m$ variables de estado en las que n es la dimensión del vector de estado y m es la dimensión del vector de salida.

Un observador que estima menos de n variables de estado, se denomina *observador de estado de orden reducido* o, simplemente, *observador de orden reducido*. Si el observador de estado de orden reducido tiene el orden mínimo posible, se denomina *observador de estado de orden mínimo*, u *observador de orden mínimo*.

Un observador de estado estima las variables de estado con base a las mediciones de las variables de salida y de control. Como veremos más adelante, los observadores de estado pueden diseñarse si y sólo si se satisface la condición de observabilidad.

En los análisis siguientes de los observadores de estado, se usará la notación $\tilde{x}(t)$ para designar el vector de estado observado.

Considere el sistema definido mediante

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.4)$$

$$y(t) = Cx(t). \quad (2.5)$$

Suponga que el estado $x(t)$ se aproximará mediante el estado $\tilde{x}(t)$ del modelo dinámico

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A\tilde{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - C\tilde{x}(t)] \quad (2.6)$$

que representa al observador de estado. Observe que el observador de estado tiene $y(t)$ y $u(t)$ como entradas y $\tilde{x}(t)$ como salida. El último término del segundo miembro de esta ecuación modelo, ecuación (2.6), es un término de corrección que contiene la diferencia entre la salida $y(t)$ medida y la salida $C\tilde{x}(t)$ estimada. La matriz L funciona como una matriz de ponderación. El término de corrección vigila el estado $\tilde{x}(t)$. Ante la presencia de una discrepancia entre las matrices A y B usadas en este modelo y las del sistema real, la adición del término de corrección ayuda a reducir los efectos producidos por la diferencia entre el modelo dinámico y el sistema real. La figura (2.6) muestra el diagrama de bloques del sistema y el observador de estado de orden completo.

A continuación se analizarán los detalles del observador de estado para el cual la dinámica se caracteriza mediante las matrices A y B mediante el término de corrección adicional, que contiene la diferencia entre la salida medida y la salida estimada. En el análisis actual, suponemos que las matrices A y B usadas en el modelo son iguales a las del sistema real.

El orden del observador de estado que se analizará aquí es igual al del sistema. Suponga que el sistema se define mediante las ecuaciones (2.4) y (2.5) y que el modelo del observador se define mediante la ecuación (2.6).

Para obtener la ecuación de error del observador, restamos la ecuación (2.6) de la ecuación (2.4).

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) - \dot{\tilde{x}}(t) &= Ax(t) - A\tilde{x}(t) - L[y(t) - C\tilde{x}(t)] \\ &= [A - LC][x(t) - \tilde{x}(t)] \end{aligned} \quad (2.7)$$

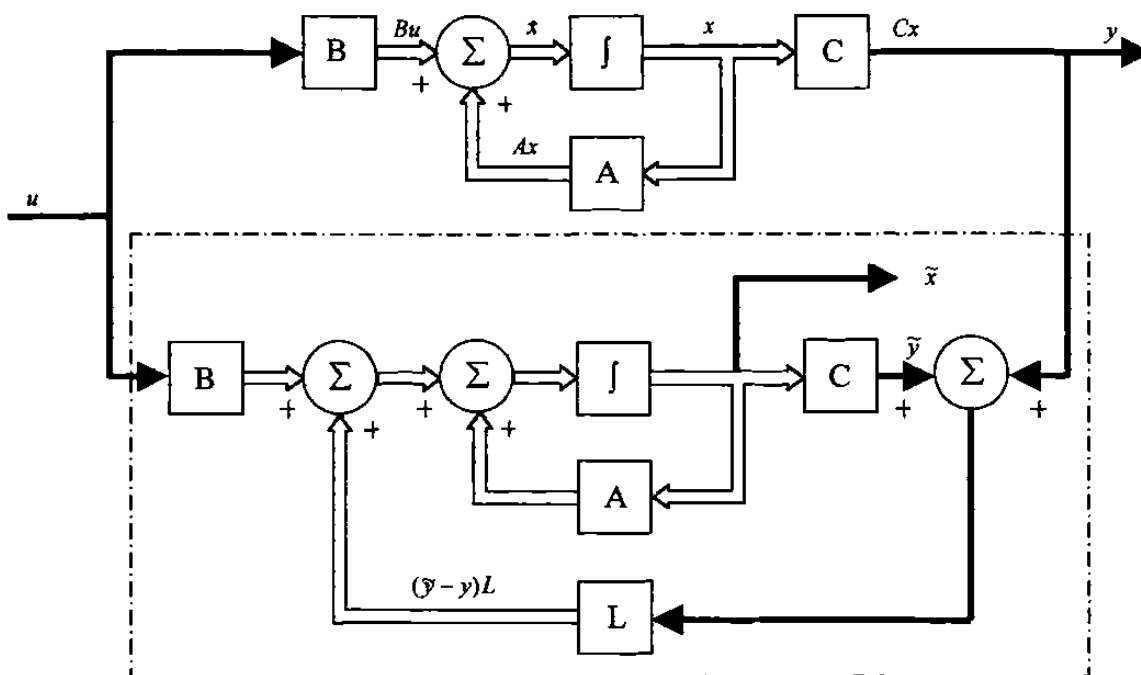


Figura 2.6 Diagrama de un observador de estado.

Defina la diferencia entre $x(t)$ y $\tilde{x}(t)$ como el vector de error $e(t)$, o

$$\dot{e}(t) = x(t) - \tilde{x}(t).$$

Así, la ecuación (2.7) se convierte en

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t). \quad (2.8)$$

A partir de la ecuación (2.8) vemos que el comportamiento dinámico del vector de error se determina mediante los valores característicos de la matriz $A - LC$. Si la matriz $A - LC$ es estable (una matriz se dice estable si todos sus valores propios tienen parte real negativa y el sistema relacionado es continuo), el vector de error convergerá a cero para cualquier vector de error inicial $e(0)$. Es decir que $\tilde{x}(t)$ convergerá a $x(t)$ sin considerar los valores de $x(0)$ y $\tilde{x}(0)$. Si se eligen los valores característicos de la matriz $A - LC$ en tal forma que el comportamiento dinámico del vector de error sea asintóticamente estable y suficientemente rápido, cualquier vector de error tenderá a cero (el origen) con una velocidad adecuada.

Si el sistema es completamente observable, se puede demostrar que es posible seleccionar una matriz L tal que $A - LC$ tenga valores característicos arbitrariamente deseados. Es decir, se determina la matriz de ganancias del observador L para producir la matriz deseada $A - LC$.

2.4.1 Problema dual. El problema de diseñar un observador de orden completo se convierte en determinar la matriz de ganancias del observador L tal que la dinámica de error definida mediante la ecuación (2-5) sea asintóticamente estable con una velocidad de respuesta suficiente. (La estabilidad asintótica y la velocidad de respuesta de la dinámica de error se determina mediante los valores característicos de la matriz $A - LC$). Por tanto, el diseño del observador de orden completo se convierte en determinar una L apropiada tal que $A - LC$ tenga los valores característicos deseados. Por lo tanto, el problema se reduce al de ubicación de polos.

Considere el sistema definido mediante

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y &= Cx(t). \end{aligned}$$

Al diseñar el observador de estado de orden completo, se resuelve el problema dual, es decir, se soluciona el problema de ubicación de polos para el sistema dual

$$\begin{aligned}\dot{z} &= A^T z + C^T v \\ n(t) &= B^T z(t)\end{aligned}$$

donde el superíndice T significa la transpuesta. Suponiendo que la señal de control es

$$v(t) = -K z(t).$$

Si el sistema dual es de estado completamente controlable, la matriz de ganancias de realimentación del estado K se determina de tal modo que la matriz $A^T - C^T K$ produzca un conjunto de los valores característicos deseados.

Si $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ son los valores característicos de la matriz del observador de estado, tomando los mismos μ , que los valores característicos deseados de la matriz de ganancias de realimentación del estado del sistema dual, obtenemos

$$sI - (A^T - C^T K) = (s - \mu_1)(s - \mu_2) \dots (s - \mu_n).$$

Considerando que los valores característicos de $A^T - C^T K$ y los de $A^T - K^T C$ son iguales, tenemos que

$$sI - (A^T - C^T K) = sI - (A - K^T C).$$

Comparando el polinomio característico $sI - (A^T - K^T C)$ y el polinomio característico $sI - (A - LC)$ para el sistema observador [consultar la ecuación (2.5)], se encuentra que L y K^T se relacionan mediante

$$L = K^T.$$

Por tanto, usando la matriz K determinada mediante el enfoque de ubicación de polos en el sistema dual, la matriz de ganancia del observador L para el sistema original se determina a partir de la relación

$$L = K^T.$$

2.4.2. Condición necesaria y suficiente para la observación de estado. Como ya se analizó, una condición necesaria y suficiente para la determinación de la matriz de ganancias del observador L para los valores deseados de $A-LC$ es que el dual del sistema original

$$\dot{z} = A^T z + C^T v$$

sea de estado completamente controlable. La condición de controlabilidad completa del estado para este sistema dual es que el rango de

$$[C^T \quad A^T C^T \quad \dots \quad (A^T)^{n-1} C^T]$$

sea n . Ésta es la condición para una observabilidad completa del sistema original definido mediante las ecuaciones (2.1) y (2.2). Esto significa que una condición necesaria y suficiente para la observación del estado del sistema definido mediante las ecuaciones (2.1) y (2.2) es que el sistema sea completamente observable.

2.5 MATRICES POLINOMIALES RACIONALES.

Las matrices polinomiales son aquellas que están formadas por polinomios en general en todos sus elementos. De esta misma manera, cuando agregamos el término racional se desea destacar que además de que los elementos de la matriz estén formados por polinomios, en general todos ellos representan razones de polinomios.

La operación de suma, resta y multiplicación de matrices polinomiales racionales es regida por las mismas leyes del álgebra lineal. Se presentan algunos ejemplos representativos a continuación.

Ejemplo 1: Sean $a(s)$ y $b(s)$ dos matrices polinomiales racionales la suma $a(s) + b(s) = c(s)$ se calcula de la siguiente manera:

$$a(s) = \begin{bmatrix} \frac{s+1}{s^2+3s+1} & 0 \\ 0 & \frac{s+2}{s^2+2s+3} \end{bmatrix}$$

$$b(s) = \begin{bmatrix} \frac{2s+5}{s^3+2s+5} & \frac{s+2}{s^2+5s-2} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$c(s) = \begin{bmatrix} \frac{s+1}{s^2+3s+1} & 0 \\ 0 & \frac{s+2}{s^2+2s+3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2s+5}{s^3+2s+5} & \frac{s+2}{s^2+5s-2} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Ejemplo 2: Sean $a(s)$ y $b(s)$ dos matrices polinomiales racionales el producto $a(s) \times b(s) = c(s)$ se calcula de la siguiente manera:

$$c(s) = \begin{bmatrix} \frac{s+1}{s^2+3s+1} & 0 \\ 0 & \frac{s+2}{s^2+2s+3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{2s+5}{s^3+2s+5} & \frac{s+2}{s^2+5s-2} \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$c(s) = \begin{bmatrix} \left(\frac{s+1}{s^2+3s+1}\right)\left(\frac{2s+5}{s^3+2s+5}\right) + (0)(1) & \left(\frac{s+1}{s^2+3s+1}\right)\left(\frac{s+2}{s^2+5s-2}\right) + (0)(0) \\ (0)\left(\frac{2s+5}{s^3+2s+5}\right) + \left(\frac{s+2}{s^2+2s+3}\right)(1) & (0)\left(\frac{s+2}{s^2+5s-2}\right) + \left(\frac{s+2}{s^2+2s+3}\right)(0) \end{bmatrix}$$

$$c(s) = \begin{bmatrix} \left(\frac{(s+1)(2s+5)}{(s^2+3s+1)(s^3+2s+5)} \right) & \left(\frac{(s+1)(s+2)}{(s^2+3s+1)(s^2+5s-2)} \right) \\ \left(\frac{s+2}{s^2+2s+3} \right) & 0 \end{bmatrix}$$

La resta de matrices polinomiales racionales se realiza como una suma algebraica, es decir, $a(s) - b(s) = c(s)$. Ver ejemplo 1.

Nota: La nomenclatura utilizada para nombrar las matrices polinomiales, en los ejemplos anteriores, es arbitraria y no tiene ninguna relación con la nomenclatura usada en capítulos posteriores.

3

OBSERVACIÓN SIMULTÁNEA

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

En este capítulo hay interés en diseñar un observador el cual pueda observar los estados de una familia dada de plantas. Específicamente, se supone que $G_0(s), G_1(s), \dots, G_n(s)$ son un número finito de plantas dadas, es deseable conocer si existe o no un observador común para este arreglo de plantas.

Considerar la familia de sistemas invariantes en el tiempo descrito por

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \quad (3.1)$$

$$y(t) = C_i x(t) + D_i u(t), \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (3.2)$$

donde $x(t) \in R^n$ es el vector de estado, $u(t) \in R^p$ es el vector de entrada y $y \in R^m$ es el vector de observación y A_i, B_i, C_i, D_i son matrices constantes de dimensiones apropiadas. Al calcular la transformada de Laplace de (3.1) y (3.2), se obtiene

$$y(s) = G_i(s)u(s) \quad (3.3)$$

con

$$G_i(s) = C_i(sI - A_i)^{-1}B_i + D_i.$$

Es deseable diseñar un observador, el cual producirá una estimación para

$$z(t) = E_i x(t) \quad (3.4)$$

con $E_i \in R^{k \times n}$. Un observador para los sistemas (3.1)-(3.3) es expresado como la dinámica de un sistema

$$r(s) = F(s)u(s) + H(s)y(s) \quad (3.5)$$

con la propiedad que el error de estimación satisface

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (E_i x(t) - r(t)) = 0 \quad (3.6)$$

para toda $u(s)$, donde $F(s)$ y $H(s)$ son matrices RH_∞ , ellas son matrices con función de transferencia estable. Si existe tal observador, se dice que $G_0(s), G_1(s), \dots, G_n(s)$ en (3.3) son simultáneamente observables.

El problema a resolver es: dadas $n+1$ plantas como (3.1), (3.2) y (3.3), saber si existe un observador común para esta familia de plantas. A este se le llama el problema de observación simultánea.

Las factorizaciones coprima derecha y coprima izquierda de la i -ésima planta G_i son

$$G_i(s) = N_i(s)M_i^{-1}(s) = \hat{M}_i^{-1}(s)\hat{N}_i(s) \quad (3.7)$$

respectivamente y $N_i(s), M_i^{-1}(s)$ son matrices RH_∞ coprima derecha. $\hat{M}_i(s), \hat{N}_i(s)$ son matrices RH_∞ coprima izquierda. Para la doble factorización coprima de $G_i(s)$ existe una función de transferencia RH_∞ : $Y_i(s)$, $X_i(s)$, $\hat{Y}_i(s)$ y $\hat{X}_i(s)$ tal que

$$\begin{bmatrix} Y_i(s) & X_i(s) \\ -\hat{N}_i(s) & \hat{M}_i(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_i(s) & -\hat{X}_i(s) \\ N_i(s) & \hat{Y}_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_i(s) & \hat{X}_i(s) \\ -N_i(s) & \hat{Y}_i(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_i(s) & -X_i(s) \\ \hat{N}_i(s) & \hat{M}_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

se satisface.

Cada matriz en la identidad de Bezout (3.8) puede ser calculada usando los algoritmos dados en [VIDYASAGAR, 1985]. La construcción del espacio de estado de los factores coprimos derechos $N_i(s)$ y $M_i(s)$ es dada como sigue:

$$N_i(s) = C_i(sI - A_k)^{-1} B_i + D_i \quad (3.9)$$

$$M_i(s) = K_i(sI - A_k)^{-1} B_i + I \quad (3.10)$$

donde K_i es matriz tal que $A_k = A_i + B_i K_i$ es estable y $C_k = C_i + D_i K_i$.

Se define el estado parcial $\xi(s)$ como sigue

$$M_i(s)\xi(s) = u(s).$$

Entonces las ecuaciones (3.7) y (3.3) pueden ser escritas como

$$M_i(s)\xi(s) = u(s) \quad (3.11)$$

$$y(s) = N_i(s)\xi(s) \quad (3.12)$$

y la variable $E_i(s)$ de acuerdo a (3.4) puede ser expresada por

$$z(s) = P_i(s)\xi(s) \quad (3.13)$$

donde $P_i(s)$ puede ser calculada como sigue.

De la ecuación (3.7), la factorización coprima derecha de la i -ésima planta G_i puede ser escrita como

$$C_i(sI - A_i)^{-1} B_i + D_i = N_i(s)M_i^{-1}(s).$$

Usando las ecuaciones (3.9) y (3.10) se obtiene

$$(sI - A_i)^{-1} B_i + D_i = (sI - A_i)^{-1} B_i M_i^{-1}(s) \quad (3.14)$$

lo cual conduce a

$$x(s) = (sI - A_i)^{-1} B_i u(s) = (sI - A_k)^{-1} B_i \xi(s).$$

Así, la variable $z(s)$ en (3.13) es obtenida con matrices RH_∞

$$P_i(s) = E_i (sI - A_k)^{-1} B_i \quad (3.15)$$

Entonces el problema de diseñar un observador común para los sistemas (3.1), (3.2) o (3.3) puede ser iniciado encontrando las matrices $F(s), H(s) \in RH_\infty$ tal que para toda $u(s)$

$$z(s) - r(s) = 0 \quad (3.16)$$

La condición (3.16) queda satisfecha y $E_i x(t)$ puede ser observado si y solo si se satisface la condición siguiente:

$$F(s)M_i(s) + H(s)N_i(s) = P_i(s). \quad (3.17)$$

Cuando solo una planta es considerada en (3.1), (3.2) y (3.3), la parametrización del observador (3.5) ha sido dada en [DING-ET. AL., 1991] y [DING-FRANK, 1990] usando la factorización [VIDYASAGAR, 1985]. El resultado es dado en el siguiente lema.

Lema 1 [DING-FRANK, 1990]: El arreglo de matrices RH_∞ , $F(s)$ y $H(s)$ que satisfacen

$$F(s)M(s) + H(s)N(s) = P(s) \quad (3.18)$$

es dado por

$$F(s) = P(s)Y(s) - Q(s)\hat{N}(s) \quad (3.19)$$

$$H(s) = P(s)Y(s) + Q(s)\hat{M}(s), \quad Q(s) \in RH_\infty \quad (3.20)$$

y para toda matriz $Q(s) \in RH_\infty$ de dimensiones apropiadas, $F(s)$ y $H(s)$ satisfaciendo (3.19) y (3.20) también cumple la condición de existencia (3.18) del observador.

Basado en esta parametrización, ahora se puede considerar la existencia del problema de observación simultanea. Ahora es deseable saber si existe o no un observador común con la forma (3.5) que satisfaga la condición del observador existente (3.17) para el arreglo dado de plantas (3.1), (3.2) o (3.3), y si este observador existe, ¿como diseñarlo?

3.2 RESULTADOS PRINCIPALES.

Primero, se estudia el problema de observar simultáneamente los estados de dos plantas, las cuales pueden ser iniciadas como sigue: Dadas dos plantas $G_0(s)$ y $G_1(s)$, ¿cuando existe un observador común tal que ellas sean ambas observables?

Teorema 1 [YAO-ET. AL., 1995]: Dadas dos plantas $G_0(s)$ y $G_1(s)$, definir

$$A(s) = Y_0(s)M_1(s) + N_0(s)N_1(s) \quad (3.21)$$

$$B(s) = -\hat{N}_0(s)M_1(s) + \hat{M}_0(s)N_1(s) \quad (3.22)$$

Entonces $G_0(s)$ y $G_1(s)$ pueden ser observadas simultáneamente si y solo si existe una $R(s) \in RH_\infty$ tal que

$$P_0(s)A(s) + R(s)B(s) = P_1(s) \quad (3.23)$$

se cumpla.

Prueba [YAO- ET. AL., 1995]: Del lema 1, la familia de observadores que pueden observar $G_0(s)$ y $G_1(s)$ es dada por

$$\begin{aligned} r(G_0) &= \{F_0(s) = P_0(s)Y_0(s) - Q_0(s)\hat{N}_0(s) \\ H_0(s) &= P_0(s)X_0(s) + Q_0(s)\hat{M}_0 : Q_0(s) \in RH_\infty\}. \end{aligned} \quad (3.24a)$$

$$\begin{aligned} r(G_1) &= \{F_1(s) = P_1(s)Y_1(s) - Q_1(s)\hat{N}_1(s). \\ H_1(s) &= P_1(s)X_1(s) + Q_1(s)\hat{M}_1 : Q_1(s) \in RH_\infty\}. \end{aligned} \quad (3.24b)$$

De $G_0(s)$ y $G_1(s)$ puede ser simultáneamente observado si y solo si existe $Q_0(s), Q_1(s) \in RH_\infty$ tal que

$$P_0(s)Y_0(s) - Q_0(s)\hat{N}_0(s) = P_1(s)Y_1(s) - Q_1(s)\hat{N}_1(s). \quad (3.25)$$

$$P_0(s)X_0(s) + Q_0(s)\hat{M}_0(s) = P_1(s)X_1(s) - Q_1(s)\hat{M}_1(s). \quad (3.26)$$

Ahora (3-25), (3-26) pueden ser reescritas como

$$\begin{bmatrix} P_0(s) & Q_0(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_0(s) & X_0(s) \\ -N_0(s) & M_0(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1(s) & Q_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1(s) & X_1(s) \\ -N_1(s) & M_1(s) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

lo cual es equivalente a

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} P_0(s) & Q_0(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_0(s) & X_0(s) \\ -\hat{N}_0(s) & \hat{M}_0(s) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} P_1(s) & Q_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1(s) & -\hat{X}_1(s) \\ N_1(s) & \hat{Y}_1(s) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} P_1(s) & Q_1(s) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.28)$$

de (3.8), o

$$\begin{bmatrix} P_0(s) & Q_0(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(s) & S(s) \\ B(s) & T(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1(s) & Q_1(s) \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

donde

$$\begin{bmatrix} A(s) & S(s) \\ B(s) & T(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_0(s) & X_0(s) \\ -\hat{N}_0(s) & \hat{M}_0(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1(s) & -\hat{X}_1(s) \\ N_1(s) & \hat{Y}_1(s) \end{bmatrix}. \quad (3.30)$$

Así $G_0(s)$ y $G_1(s)$ pueden ser simultáneamente observables si y solo si existe $Q_0(s).Q_1(s) \in RH_\infty$ tal que (3.29) sea satisfecha. Por lo tanto, el teorema 1 es probado si se puede establecer que (3.29) se cumple si y solo si $P_0(s)A(s) + R(s)B(s) = P_1(s)$ para alguna $R(s) \in RH_\infty$.

Suponiendo que (3.29) se cumple para un conveniente $Q_0(s).Q_1(s) \in RH_\infty$ entonces $P_0(s)A(s) + Q_0(s)B(s) = P_1(s)$. Recíprocamente, se supone que $P_0(s)A(s) + R(s)B(s) = P_1(s)$ para algún valor $R(s) \in RH_\infty$, entonces (3.29) se cumple con $Q_0(s) = R(s).Q_1(s) = (S(s) + Q_0(s)T(s))$. Esto completa la prueba.

El teorema 1 muestra que el problema de la observación simultánea de dos plantas puede ser reducido a aquel de la simple observación de una planta usando un observador común.

Corolario 1 [YAO-ET. AL., 1995]: Si la condición (3.23) es satisfecha para dos plantas $G_0(s)$ y $G_1(s)$ en el teorema 1, entonces

$$F_0(s)M_1(s) + H_0(s)N_1(s) = P_1(s) \quad (3.31)$$

Prueba [YAO-ET. AL., 1995]: Este es un resultado directo del teorema 1; su prueba será omitida.

Este corolario indica que el observador de la primer planta $G_0(s)$ puede ser usado para observar la segunda planta $G_1(s)$. Por lo tanto, dos plantas pueden ser observadas por un observador común. Este resultado es más intuitivo en el siguiente corolario.

Corolario 2 [YAO-ET. AL., 1995]: Suponer que $G_0(s)$ es estable y que $G_1(s)$ es arbitrario. Entonces $G_0(s)$ y $G_1(s)$ pueden ser simultáneamente observadas si y solo si $G_0(s) - G_1(s)$ puede ser observado.

Prueba [YAO-ET. AL., 1995]: Suponer que $N_1(s)M_1^{-1}(s)$ es una factorización coprima derecha de $G_1(s)$. Si $G_0(s)$ es estable, entonces $\hat{N}_0(s) = G_0(s)$, $\hat{M}_0(s) = I$, $Y_0(s) = I$ y $X_0(s) = 0$. De

$$\begin{aligned} \hat{G}(s) &= B(s) A(s)^{-1} \\ &= (N_1(s) - G_0(s)M_1(s)) M_1(s)^{-1} \\ &= G_1(s) - G_0(s) \end{aligned} \quad (3.32)$$

se observa que $(N_1(s) - G_0(s)M_1(s))M_1(s)^{-1}$ es una factorización coprima derecha de $G_1(s) - G_0(s)$. Del teorema 1 se concluye que

$$P_0(s)M_1(s) + R(s)(N_1(s) - G_0(s)M_1(s)) = P_1(s) \quad (3.33)$$

lo cual puede ser escrito como

$$(P_0(s) - R(s)G_0(s))M_1(s) + R(s)N_1(s) = P_1(s) \quad (3.34)$$

se define

$$\hat{F}(s) = (P_0(s) - R(s)G_0(s)) \quad (3.35)$$

$$\hat{H} = R(s) \quad (3.36)$$

entonces (3.34) muestra que $r(s) = \hat{F}(s)u(s) + \hat{H}(s)y(s)$ puede observar la planta $G_1(s)$. También se prueba que

$$(P_0(s) - R(s)G_0(s))M_0(s) + R(s)N_0(s) = P_0(s) \quad (3.37)$$

Así, $r(s) = \hat{F}(s)u(s) + \hat{H}(s)y(s)$ puede observar la planta $G_0(s)$. Por lo tanto, $G_0(s)$ y $G_1(s)$ pueden ser simultáneamente observados.

Puede verse de (3.19) y (3.20), de hecho, que $r(s) = \hat{F}(s)u(s) + \hat{H}(s)y(s)$ es el observador de la primera planta $G_0(s)$ con $Q_0(s) = R(s)$.

A continuación se abordará el problema de la observación simultánea con más de dos plantas. Es deseable saber si existe o no un observador que pueda observar cada una de un arreglo dado de plantas $G_0(s), G_1(s), \dots, G_n(s)$. En el siguiente teorema se expondrá una condición necesaria y suficiente para observar simultáneamente $n+1$ plantas usando un observador.

Teorema 2 [YAO-ET. AL., 1995]: Suponer que $G_0(s), G_1(s), \dots, G_n(s)$ son plantas dadas, definir

$$A_i(s) = Y_0(s)M_i(s) + N_0(s)N_i(s) \quad (3.38)$$

$$B_i(s) = -\hat{N}_0(s)M_i(s) + \hat{M}_0(s)N_i(s) \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.39)$$

entonces $G_0(s), G_1(s), \dots, G_n(s)$ pueden ser simultáneamente observadas si y solo si existe una $R(s) \in RH_\infty$ tal que

$$P_0(s)A_i(s) + R(s)B_i(s) = P_i(s) \quad (3.40)$$

se cumpla para $i = 1, 2, \dots, n$.

Prueba [YAO- ET. AL., 1995]: La prueba es muy parecida a la del teorema 1 y será omitida aquí.

Se muestra en el teorema 2 que el problema de observación simultánea de $n+1$ plantas es equivalente a aquel de la observación simultánea de n plantas usando un observador común.

Ahora se supone que $R(s) \in RH_\infty$ existe, el cual puede observar la planta auxiliar $\hat{G}(s)$, entonces de (3.5), (3.19) y (3.20), el observador común para la planta $G_0(s)$ y $G_1(s)$ es justamente

$$r(s) = [P_0(s)Y_0(s) - R(s)\hat{N}_0(s)u(s)] + [P_0(s)X_0(s) + R(s)\hat{M}_0(s)y(s)] \quad (3.41)$$

De acuerdo al corolario 2, la planta $G_0(s)$ es estable, entonces de (3.35) y (3.36), el observador tiene la forma siguiente

$$r(s) = [P_0(s) - R(s)G_0(s)u(s)] + [R(s)y(s)]. \quad R(s) \in RH_\infty \quad (3.42)$$

donde $R(s)$ puede ser obtenida de (3.23).

3.3 CONCLUSIÓN.

Se presentó un nuevo problema de observación, llamado problema de observación simultánea, el cual fue tomado de [YAO-ET. AL., 1995]. Este es caracterizado por el uso del método de factorización coprima. Se dedujeron condiciones necesarias y suficientes para la existencia de observación simultánea. También se mostró que una solución general para el problema de observación simultánea reduce el problema de observar n plantas con un observador común a uno que observa $n+1$ plantas usando un observador común.

4

S O B R E L A F A L T A D E D E T E C T A B I L I D A D

4.1 LA DETECTABILIDAD DE FALLAS.

En el presente capítulo se abordará el tema de la detección de fallas y, por lo tanto, es conveniente tener en claro que una falla es una variación no permitida de al menos una propiedad o variable de un sistema. La variación no permitida (o falla) puede ser provocada por un cambio en la entrada del sistema, por una alteración en la estructura y/o por cambios en los valores iniciales (o parámetros), de este. Será motivo de estudio, en forma exclusiva, la variación en los parámetros del sistema, de tal manera que la detectabilidad de fallas se estudiará pensando en las fallas ocurridas debido a la variación no deseada de algún o algunos parámetros.

El problema de decidir cuando una falla puede ser detectada ha sido considerado en diversos trabajos, como por ejemplo, el trabajo seminal de [BEARD, 1971], o el trabajo de [MASSOUMNIA, 1986] el cual utiliza un enfoque geométrico, en [WÜNNENBERG, 1990] se hace uso de la forma canónica de Kronecker, o en [GE-

FANG, 1988], [HOU-MULLER, 1994], [CHEN-PATTON, 1994] los cuales se basan en la teoría de observadores con entradas desconocidas, en el dominio de la frecuencia [DING, 1992] o más recientemente en [ALCORTA, 1999].

A excepción de los trabajos [DING, 1992] y [ALCORTA, 1999], las condiciones de detectabilidad de fallas están relacionadas con un método específico. La cuestión crítica surge con la pregunta ¿es posible la detección de una falla con un método cuando la falla no es detectable con otro método?

En la mayoría de los casos citados anteriormente, las condiciones de detectabilidad son generalmente obtenidas a partir de los residuos. Los residuos son señales que de manera ideal son cero cuando no hay fallas y distintas de cero cuando las fallas están presentes. Una manera de construir los residuos es utilizando observadores. Usando el conocimiento del modelo nominal del sistema, se diseña un observador de la salida. El residuo se obtiene como la diferencia entre la salida medida del sistema y la estimada por el observador.

Considere un sistema lineal e invariante en el tiempo el cual esta sujeto a fallas:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E f(t) \quad (4.1a)$$

$$y(t) = Cx(t) + x(t) = x_0 \quad (4.1b)$$

y un observador de estado

$$\dot{\hat{x}}(t) = (A - LC)\hat{x}(t) + Bu + Ly \quad (4.2a)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \quad \hat{x}(0) = 0 \quad (4.2b)$$

Las ecuaciones del error de estimación del estado $\tilde{x} = x - \hat{x}$ y de la salida $r = y - \hat{y}$ resultan:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A\tilde{x}(t) + E f(t) \quad (4.3a)$$

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) = C\tilde{x} \quad (4.3b)$$

De acuerdo con la definición de los residuos, si $r(t)$ es diferente de cero, al menos una falla debería estar presente en el sistema. Para que se cumpla esto en el sistema (4.3), que describe el comportamiento del error, se requiere que la matriz $A + LC$ tenga todos sus valores propios con parte real negativa y que la función (matriz) de transferencia $C(sI - A - LC)^{-1}$ no sea idénticamente cero y la falla en cuestión consideración no anule su efecto con los ceros del sistema (4.3).

Hasta aquí el problema de detectabilidad parece resuelto, sin embargo, la manera de caracterizar las fallas como cambios en los parámetros (vea por ejemplo [ALCORTA, 1999]) y los resultados disponibles sobre observación simultánea permiten reconsiderar el problema desde un punto de vista nuevo.

4.2 LA FALTA DE DETECTABILIDAD DE FALLAS.

Consideremos un sistema lineal descrito por las ecuaciones (4.1) y suponer que las fallas se manifiestan en el sistema como cambios en los parámetros. La representación como un término aditivo en (4.1) es realmente obtenido a través de un procedimiento de simplificación. Esta simplificación produce una pérdida de información, pues lo que se enmascara como f es realmente el producto de las fallas y los estados del sistema y las entradas, vea por ejemplo [ALCORTA, 1999].

Partiendo de un sistema lineal nominal y suponiendo que una falla provoca el cambio de uno o varios elementos de la matriz A (modificando el valor nominal A_0 en el valor actual A_1 y dejando a las matrices B y C sin cambios ($B_0 = B$ y $C_0 = C$)). Suponer, además, que el observador diseñado para supervisar el sistema nominal satisface las condiciones de observación simultánea para el sistema nominal y el actual. Note que en este caso la falla no podría ser detectada.

Dicho de otro modo, considere el sistema actual:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4.4a)$$

$$\hat{y}(t) = C \hat{x}(t) \quad \hat{x}(0) = 0 \quad (4.4b)$$

$$\dot{x}(t) = A_0 \hat{x}(t) + B_0 u + L (y - C_0 x)$$

donde la matriz A actual esta dada por $A_0 + \Delta$. El correspondiente observador para el sistema anterior es:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A_0 \hat{x}(t) + B_0 u + L (y - C_0 x) \quad (4.5a)$$

$$\hat{y}(t) = C \hat{x}(t) \quad \hat{x}(0) = 0 \quad (4.5b)$$

Note que para que $\tilde{x} \rightarrow 0$ el par $(A - LC_0, \Delta)$ debe de ser completamente no controlable. Las fallas que no pueden ser detectadas son justamente las que están en el espacio nulo del espacio generado por el par (A_0, LC_0) . Una base para este espacio lo es también para las fallas que no pueden ser detectadas.

5

CARACTERIZACIÓN DE LA FALTA DE DETECTABILIDAD DE FALLAS

5.1 INTRODUCCIÓN.

En el presente capítulo se desea dejar en evidencia el problema de la falta de detectabilidad de fallas debido a la observación simultánea. Se apoyará el análisis en un ejemplo académico, considerando un sistema dinámico el cual, será afectado por fallas multiplicativas, exclusivamente. Se recuerda que solo se considerara que ha sucedido un falla cuando ocurra el cambio de al menos un parámetro del sistema y, no así, cuando se presente un cambio en la entrada del sistema o un cambio en su estructura.

5.2 EJEMPLO DEL DISEÑO DE UN OBSERVADOR COMÚN.

El diseño de un observador común para n plantas dadas, llámense $G_0(s)$, $G_1(s)$... $G_n(s)$ se logra obteniendo las matrices RH_ω , $\hat{F}(s)$ y $\hat{H}(s)$ que componen el observador de estados, para este fin se utilizan las fórmulas que relacionan el espacio de estado y la representación de la doble factorización coprime. Una vez definidos los

cofactores se aplican las condiciones de observación simultánea. A continuación se presenta un ejemplo académico donde se aplica la metodología para obtener un observador común para dos plantas dadas $G_0(s)$ y $G_1(s)$, en este ejemplo se pretende mostrar el desarrollo de la metodología.

Se considerará una planta que trabaja en condiciones nominales nombrada $G_0(s)$ y la misma planta pero en condiciones de falla llamada $G_1(s)$. La representación en espacio de estado de la planta $G_0(s)$ es la siguiente:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (5.1)$$

$$y = [2 \quad 7] x(t) \quad (5.2)$$

$$z = [2 \quad 7] x(t) \quad (5.3)$$

Los valores de los parámetros (a_{21}, a_{22}) para el sistema $G_0(s)$ y el sistema $G_1(s)$ son respectivamente:

$$1) (a_{21}, a_{22}) = (-1, -2);$$

$$2) (a_{21}, a_{22}) = (-2, -3).$$

Ahora con estas condiciones de operación obtenemos la función de transferencia de cada sistema, aplicando la fórmula

$$G_i = C_i (sI - A_i)^{-1} B_i + D_i$$

y obtenemos

$$G_0(s) = \frac{2s-3}{s^2+2s+1}, \quad G_1(s) = \frac{2s-8}{s^2+3s+2} \quad (5.4)$$

Debido a que la planta $G_0(s)$ es estable los correspondientes valores de la doble factorización coprime para la primera planta son:

$$\hat{N}_0 = \frac{2s-3}{s^2+2s+1} = G_0(s),$$

$$M_0(s) = 1, X_0(s) = 0, Y_0(s) = 1.$$

$$P_0(s) = \frac{s+3}{s^2+2s+1}$$

y los elementos correspondientes de la doble factorización coprime para la segunda planta son

$$M_1(s) = \frac{s^2+3s+2}{s^2+2s+3}, N_1(s) = \frac{2s-8}{s^2+2s+3},$$

$$P_1(s) = \frac{s-5}{s^2+2s+3}.$$

Se aclara que no existe una solución única para los elementos de la doble factorización coprime, de tal manera que pueden obtenerse valores muy diferentes a los presentados aquí, según el método que se utilice para realizar la factorización.

De las ecuaciones 3.21 y 3.22 del *Teorema 1*, se obtiene

$$A(s) = Y_0(s)M_1(s) + X_0(s)N_1(s) = \frac{s^2+3s+2}{s^2+2s+3}, \quad (5.5)$$

$$B(s) = -\hat{N}_0(s)M_1(s) + \hat{M}_0(s)N_1(s) = \frac{-(7s^2+9s+2)}{(s^2+2s+3)(s^2+2s+1)}. \quad (5.6)$$

De la ecuación 3.23, se obtiene

$$R(s) = \frac{-s+1}{7s+2} \in RH_\infty. \quad (5.7)$$

donde

$$\hat{F}(s) = P_0(s) - R(s)G_0(s) = \frac{9}{7s+2}. \quad (5.8)$$

y

$$\hat{H}(s) = R(s) = \frac{-s+1}{7s+2} \quad (5.9)$$

Ahora de la ecuación 3.42, el observador es dado por

$$r(s) = \frac{9}{7s+2} u(s) + \frac{-s+1}{7s+2} y(s). \quad (5.10)$$

El observador 5.10 puede observar simultáneamente las dos plantas en 5.4, con lo cual se demuestra que en caso de ocurrir la falla que se ha previsto, esta no será detectada por un generador de residuos convencional. Con la intención de aclarar y analizar esta problemática se realizara la simulación de la generación residual con la ayuda del SIMULINK.

5.3 DISEÑO DE UN OBSERVADOR EN MATLAB.

Para el diseño de un observador de estado común para dos plantas dadas, se utilizará el programa 5.1, el cual corre en MATLAB. Este programa será de mucha utilidad para analizar de manera simple e intuitiva, como es que perjudica el efecto de la observación simultánea en la detección de fallas Se considera a este programa una buena aportación para el análisis de esta problemática por futuros investigadores, por lo cual, se consideró conveniente presentar una copia fiel para su rápida implementación y se presenta a continuación:

Programa 5.1 .-

```
- DISEÑO DE UN OBSERVADOR COMUN PARA DOS PLANTAS DADAS G0(S Y G1(S
+ MATRICES DE LA PLANTA G0(S :
A0 = [ 0 1; -1 -2 ];
B0 = [ 1; 0 ];
C0 = [ 2 7 ];
D0 = [ 0 ];
PL1 = [ -1; -2 ];
K0 = place(A0,B0,PL1);
K0 = -K0;
F0 = place(A0',C0',PL1);
F0 = F0';
SYS0 = ss(A0,B0,C0,D0);
ct0 = rank(ctrb(SYS0));
ob0 = rank(observ(SYS0));
if ct0 < 2 | ob0 < 2
' No existe observacion simultánea'
```

```

end

    MATRICES DE LA PLANTA G1 S :
A1 = [ 0 1; -2 -3 ];
B1 = [ 1; 0 ];
C1 = [ 2 7 ];
D1 = [ 0 ];
PL2 = [ -1; -2 ];
K1 = place(A1,B1,PL2);
K1 = -K1;
F1 = place(A1',C1',PL2);
F1 = F1';
SYS1 = ss(A1,B1,C1,D1);
ctl = rank(ctrb(SYS1));
obl = rank(observ(SYS1));
if ctl < 2 | obl < 2
    ' No existe observacion simultanea'
end

^ Funcional a ser observada.
E = [ 2 7 ];

^ Factores de la doble factorizacion coprime
para su representacion en espacio de estados:

- Valores para Y0 s .
Y0sA = A0-(F0*C0); Y0sB = B0; Y0sC = -K0; Y0sD = 1;
  Valores para M1 s .
M1sA = A1+(B1*K1); M1sB = B1; M1sC = K1; M1sD = 1;
  Valores para X0 s .
X0sA = A0-(F0*C0); X0sB = F0; X0sC = -K0; X0sD = 0;
  Valores para N1(s .
N1sA = A1+(B1*K1); N1sB = B1; N1sC = C1; N1sD = 0;
- Valores para N0gorro s .
N0gsA = A0-(F0*C0); N0gsB = B0; N0gsC = C0; N0gsD = 0;
- Valores para M0gorro s .
M0gsA = A0-(F0*C0); M0gsB = -F0; M0gsC = C0; M0gsD = 1;

- Representacion en espacio de estado y
^ conversion a función de transferencia
^ de los factores de la doble factorizacion
- coprime:
SSY0s = SS( Y0sA,Y0sB,Y0sC,Y0sD );
TFY0s = TF( SSY0s );
SSM1s = SS( M1sA,M1sB,M1sC,M1sD );
TFM1s = TF( SSM1s );
SSX0s = SS( X0sA,X0sB,X0sC,X0sD );
TFX0s = TF( SSX0s );
SSN1s = SS( N1sA,N1sB,N1sC,N1sD );
TFN1s = TF( SSN1s );
SSN0gs = SS( N0gsA,N0gsB,N0gsC,N0gsD );
TFN0gs = TF( SSN0gs );
SSM0gs = SS( M0gsA,M0gsB,M0gsC,M0gsD );
TFM0gs = TF( SSM0gs );

```

```

% Valor de A(s) Y B(s).
As = TFY0s * TFM1s + TFX0s * TFN1s;
Bs = -TFN0gs * TFM1s + TFM0gs * TFN1s;

% Valores de P0(s) y P1(s).
AK0 = A0 + ( B0*K0 );
AK1 = A1 + ( B1*K1 );
SSP0s = SS( AK0,B0,E,D0 );
TFP0s = TF(SSP0s);
SSP1s = SS( AK1,B1,E,D1 );
TFP1s = TF(SSP1s);

% Función de transferencia de ambas plantas.
SSG0s = SS( A0,B0,C0,D0 );
TFG0s = TF( SSG0s );
SSG1s = SS( A1,B1,C1,D1 );
TFG1s = TF( SSG1s );

% Valor de R(s).
Rs = (TFP1s - TFP0s*As)/Bs;

% Valor de Fg(s) Y Hg(s):
Fgs = TFP0s*TFY0s - Rs*TFN0gs;
Hgs = TFP0s*TFX0s + Rs*TFM0gs;

% r(s) = Fg(s) u(s) + Hg(s) Y(s)

%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
% Info para Simulink
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
n_Fgs = Fgs.num{1};
d_Fgs = Fgs.den{1};
%=====
n_Hgs = Hgs.num{1};
d_Hgs = Hgs.den{1};
%=====

```

5.4 SIMULACIÓN DE LA GENERACIÓN RESIDUAL.

Para entender la simulación y poder interpretar los resultados de la generación residual con más facilidad es aconsejable que el lector reproduzca esta prueba en SIMULINK, siguiendo las indicaciones que aquí se presentan. Seguramente basándose en el diagrama de la figura 5.1, resultará relativamente sencilla la acción de reproducir esta generación residual para investigaciones futuras, claro que es necesario tener conocimientos para el uso adecuado del SIMULINK y obviamente en MATLAB pero aquí se hace hincapié en los puntos importante a cuidar para la reproducción correcta de esta simulación.

En la implementación del diagrama de la figura 5.1 en SIMULINK se necesitan algunos dispositivos, los cuales de izquierda a derecha son (ver figura 5.1): una fuente de señal escalón, cuatro fuentes de señal constante, un switch de umbral, una fuente generadora de señal de onda senoidal, dos productos, seis sumadores, dos integradores, cuatro ganancias escalares, dos funciones de transferencia y dos osciloscopios. Una vez identificados y encontrados los dispositivos en el SIMULINK, bastará con realizar las conexiones de acuerdo a la figura 5.1, teniendo cuidado de asignar el o los valores correspondientes a cada elemento para dejar armado el generador de residuos.

En el diagrama de la figura 5.1 se puede apreciar que el valor de los parámetros a_{21}, a_{22} (en el diagrama: Sw1-A21, Sw1-A22, Sw2-A21 y Sw2-A22) para ambos sistemas son en todo momento modificables, así como los valores del vector de estimación $E(s) = [2 \ 7]$ y los valores del vector de salida $C(s) = [2 \ 7]$. Lo anterior da cierto grado de libertad para realizar algunas pruebas modificando valores a conveniencia, según sea necesario.

5.5 RESULTADOS DE LA GENERACIÓN RESIDUAL EN SIMULINK.

La prueba inicia limpiando la memoria del MATLAB (comando `clear all`) para no tener problemas con variables previamente asignadas en memoria. Ahora dentro del MATLAB se corre el programa 5.1 y se abre el archivo que contiene el diagrama 5.1, así se corre la simulación de la generación residual. Los resultados serán los siguientes:

La figura 5.2 muestra la señal de salida del observador de estados, la cual es una onda senoidal.

Por otra parte, en la figura 5.3 se muestra la gráfica de la señal de salida del residuo contra tiempo. Analizando la gráfica de la figura 5.3 en el punto donde se realiza el cambio de una planta a otra, es decir, en el punto donde se provoca la falla (esto es en el valor de tiempo 10, sobre el eje horizontal), es bastante obvio que no existe un cambio

repentino en la curva debido a que la amplitud de la curva varía $\pm 2 \times 10^{-16}$, lo cual, para fines prácticos equivale a cero y, por lo tanto, es ya un hecho que el generador residual permaneció insensible a la ocurrencia de la falla.

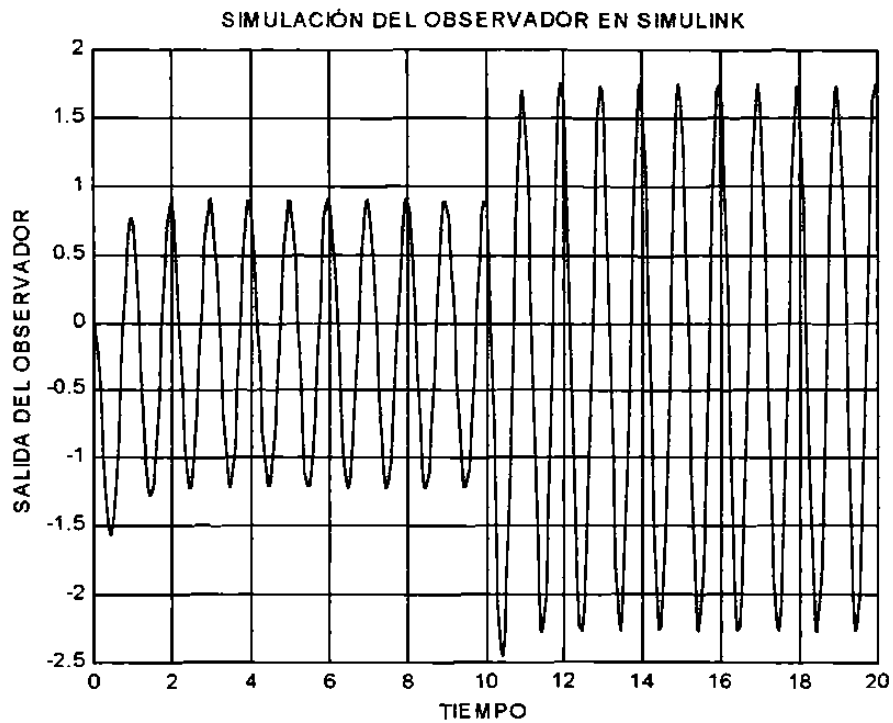


Figura 5.2 Gráfica de la salida del observador.

Reflexionando de lo ocurrido anteriormente se dirá que se construyó un estimador, el cual observa simultáneamente dos sistemas $G_0(s)$ y $G_1(s)$, los cuales, representan una planta en condiciones nominales de operación $G_0(s)$ y la misma planta pero en condiciones anormales de operación $G_1(s)$. Ahora la idea fue construir un generador residual buscando que intentase detectar dicha falla.

De lo anterior se concluye que debido a que la salida del generador residual dio cero y conociendo de antemano que intencionalmente provocamos una falla, pasando de un sistema, a otro sistema ligeramente diferente, la falta de detectabilidad de fallas debido a los efectos de la observación simultánea causa que el generador residual permanezca insensible ante cierto tipo de fallas, evidenciando su vulnerabilidad.

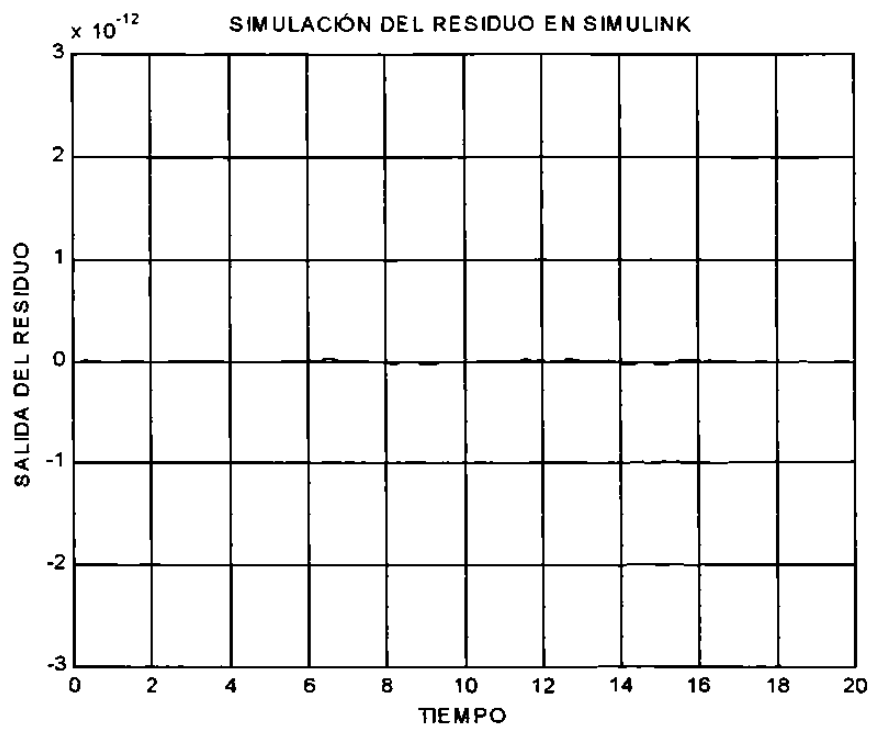


Figura 5.3 Gráfica de la salida del residuo.

6

EJEMPLO DE APLICACIÓN

6.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se pretende establecer las bases para realizar la caracterización de aquellas fallas que no son detectables debido a la observación simultánea. Se aclara que aún no existe ninguna publicación que trate este tema, ni siquiera en forma conceptual. Así que, debido a la gran limitante que representa el tiempo para la entrega de esta tesis, estaría fuera de alcance la posibilidad de dejar resuelto el caso general de la caracterización de las fallas que no son detectables debido a la observación simultánea.

Por lo anterior, el alcance para esta propuesta será, tomar el ejemplo particular de un motor de corriente directa, con el cual se pretende dejar bases sólidas que sean de gran ayuda para que alguien más resuelva el caso general, determinando condiciones necesarias y suficientes para la realización de dicha caracterización. Obviamente los beneficios de poder conocer esta(s) condición(es) se verán reflejados en la posibilidad del diseñador de sistemas de control para poder afirmar con seguridad cuando es posible o no detectar una falla.

6.2 MODELO DE UN MOTOR DE C. D.

Para el análisis se utilizará un motor de corriente directa “ M ” conectado a una carga “ J ”, al cual se le modificará arbitrariamente el valor de resistencia de armadura “ R_a ” con la intención de provocar una falla en el sistema (figura 6.1). El anterior es un sistema de uso común en la industria en general y por lo mismo un ejemplo conveniente de aplicación. Para la obtención del modelo del sistema (figura 6.1) se consideran los siguientes parámetros: el valor nominal de la resistencia de armadura es $R_a = 0.2\Omega$ y el valor de falla es $R_a = 0.1\Omega$; el valor de la inductancia de armadura es insignificante $L_a \approx 0$; el momento de inercia de la combinación del motor, de la carga y el tren de engranes referido a la flecha del motor es $J = 1 \times 10^{-5} \text{ Kg} - \text{m}^2$; la constante de contra f.e.m. es $K = 5.5 \times 10^{-2} \text{ V} - \text{m} / \text{A}$; el coeficiente de fricción viscosa de la combinación del motor, de la carga y el tren de engranes referido a la flecha del motor es $K_L \approx 0$; la constante de par del motor es $K_T = 6 \times 10^{-5} \text{ N} - \text{m} / \text{A}$.

Por otro lado, las variables del sistema son: el voltaje de armadura U_a , la corriente de armadura i_a , la velocidad angular de la flecha W y el desplazamiento angular de la flecha θ .

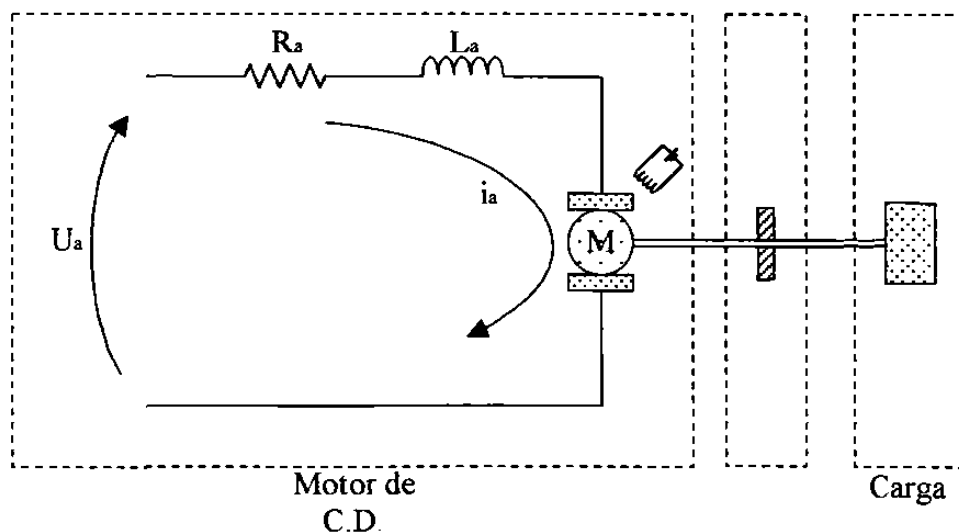


Figura 6.1 Circuito de un motor de c.d. conectado a una carga.

La ecuación diferencial para el circuito de armadura es (6.1)

$$U_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + KW(t). \quad (6.1)$$

La ecuación diferencial para el equilibrio de pares es (6.2)

$$K_T i_a(t) = J \frac{dW(t)}{dt} + K_L W(t). \quad (6.2)$$

Considerando $X_1 = \theta$ y $X_2 = W$ se obtiene (6.3)

$$\dot{X}_1 = \frac{d\theta}{dt} = W = X_2 \quad (6.3)$$

y con ayuda de esta ecuación (6.3) se deduce que $\dot{X}_2 = \frac{dW}{dt}$ y sustituyendo en (6.2) se tiene (6.4)

$$K_T i_a(t) = J \dot{X}_2 + 0. \quad (6.4)$$

Ahora (6.1) puede ser reducida a (6.5)

$$U_a(t) = R_a i_a(t) + 0 + KX_2 \quad (6.5)$$

y despejando el término $i_a(t)$ se obtiene

$$i_a(t) = \frac{U_a(t) - K_L X_2}{R_a}$$

que al sustituir en (6.4) y despejando la \dot{X}_2 resulta

$$\dot{X}_2 = -\frac{KK_T}{JR_a} X_2 + \frac{K_T}{JR_a} U_a. \quad (6.6)$$

Por último de las ecuaciones (6.3) y (6.6) se deduce la representación en espacio de estados del sistema (6.7)

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{KK_T}{JR_a} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_T}{JR_a} \end{bmatrix} U_a \quad (6.7)$$

$$Y = [7 \quad 2]X. \quad (6.8)$$

De la representación en espacio de estados se obtienen las matrices del sistema nominal, que se llamará $G_0(s)$ y las matrices correspondientes al mismo sistema pero en estado de falla, que se llamará $G_1(s)$. Las matrices se obtienen como sigue:

La representación en espacio de estados para $G_0(s)$ y $G_1(s)$ sería

$$\dot{X}(t) = A_0 X(t) + B_0 U_a(t)$$

$$Y(t) = C_0 X(t) + D_0 U_a(t)$$

y

$$\dot{X}(t) = A_1 X(t) + B_1 U_a(t)$$

$$Y(t) = C_1 X(t) + D_1 U_a(t)$$

respectivamente, entonces de (6.7) y (6.8) se deduce que:

a) Para el sistema nominal o $G_0(s)$ las matrices del sistema son

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{(5.5 \times 10^{-2})(6 \times 10^{-5})}{(1 \times 10^{-5})(0.2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1.65 \end{bmatrix}$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{6 \times 10^{-5}}{(1 \times 10^{-5})(0.2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 30 \end{bmatrix}$$

$$C_0 = [7 \quad 2]$$

$$D_0 = [0].$$

b) Para el sistema en estado de falla o $G_1(s)$ las matrices del sistema son

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{(5.5 \times 10^{-2})(6 \times 10^{-5})}{(1 \times 10^{-5})(0.1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 3.33 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{6 \times 10^{-5}}{(1 \times 10^{-5})(0.1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 60 \end{bmatrix}$$

$$C_0 = [7 \quad 2]$$

$$D_0 = [0].$$

6.3 CRITERIOS PARA LA SIMULACIÓN.

Una vez obtenido el modelo del sistema del motor de c.d. se realizarán seis pruebas para el generador de residuos "A" (Residuo "A") y seis pruebas para el generador de residuos "B" (Residuo "B"). Cada una de las pruebas se diferencia de la otra por los polos (P1, P2, P3, P4) que se utilizarán en el observador de estados de cada generador de residuos (ver tabla 6.1). Para el generador de residuos "A" se utilizará un observador de estados para la planta $G_0(s)$ aplicando las condiciones de observación simultánea para la planta $G_1(s)$; por otro lado para el generador de residuos "B" se utilizará un observador de estados para la planta $G_0(s)$ pero sin aplicar las condiciones de observación simultánea para la planta. Ahora la idea es comparar de cada escenario, en una gráfica, las salidas de los residuos A y B contra tiempo para visualizar como se comportan los residuos "A" y "B" para diferentes valores característicos o polos.

ESCENARIO	RESIDUO "A"	RESIDUO "B"
E1	P1	P1
E2	P1	P2
E3	P3	P3
E4	P3	P4
E5	P3	P1
E6	P1	P3

Tabla 6.1 Tabla que muestra los seis escenarios de prueba para cada caso.

En la tabla 6.1 se muestran numerados los escenarios desde E1 hasta E6, mismos que serán resumidos en seis gráficas. Para cada escenario se presenta la combinación de polos a usar según sea el caso. A continuación se definen los polos:

P1 → Par de polos reales = (-4 , -5).

P2 → Par de polos reales diferentes de P1 = (-3 , -8.5).

P3 → Par de polos complejos conjugados = (-5+2i , -5-2i)

P4 → Par de polos complejos conjugados diferentes de P3 = (-3+i , -3-i).

6.4 DISEÑO DE OBSERVADORES CON MATLAB.

Para simplificar y mecanizar las labores de construcción de un observador común para cada uno de los seis escenarios, se recurrirá al programa 5.1 pero modificando los valores de las matrices de cada planta según correspondan a los del sistema del motor de c.d. y modificando también los polos según se requiera. La parte del programa 5.1 que deberá ser modificada se presenta a continuación con el nombre de programa 6.1. Se aclara que el resto del programa es idéntico al presentado en el programa 5.1.

Programa 6.1 .-

```

% DISEÑO DE UN OBSERVADOR COMUN PARA PLANTAS DADAS, G0(S) Y G1(S).

% MATRICES DE LA PLANTA G0(S).
A0 = [ 0 1; 0 -1.65 ];
B0 = [ 0; 30 ];
C0 = [ 7 2 ];
D0 = [ 0 ];
PL1 = [ -4; -5 ];
K0 = place(A0,B0,PL1);
K0 = -K0;
F0 = place(A0',C0',PL1);
F0 = F0';
SYS0 = ss(A0,B0,C0,D0);
ct0 = rank(ctrb(SYS0));
ob0 = rank(observ(SYS0));
if ct0 < 2 | ob0 < 2
    ' No existe observación simultánea'
end

```

```

% MATRICES DE LA PLANTA G1(S).
A1 = [ 0 1; 0 -3.33 ];
B1 = [ 0; 60 ];
C1 = [ 7 2 ];
D1 = [ 0 ];
PL2 = [ -4; -5 ];
K1 = place(A1,B1,PL2);
K1 = -K1;
F1 = place(A1',C1',PL2);
F1 = F1';
SYS1 = ss(A1,B1,C1,D1);
ctl = rank(ctrb(SYS1));
obl = rank(observ(SYS1));
if ctl < 2 | obl < 2
    ' No existe observación simultánea'
end

% Funcional a ser observada
E = [ 7 2 ];

```

Nótese que los polos que se usaron para ejemplificar el programa 6.1 son los de P1 (ver las líneas ocho y veinticinco), así que será necesario cambiarlos según lo indique la tabla 6.1 y de acuerdo al escenario que se pretenda analizar.

Por otra parte, para simplificar la construcción del observador de estados en cada uno de los seis escenarios del residuo "B", se diseñó el programa 6.2 y solo será necesario modificar el valor de los polos según sea requerido (ver tabla 6.1).

Programa 6.2 .-

```

% OBSERVADOR DE ESTADO PARA G0(S).

P1 = [ -4; -5 ];
K0 = place(A0,B0,P1);
K0 = -K0;
F0 = place(A0',C0',P1);
F0 = F0';
A = A0-F0*C0;
B = B0;
C = C0;
D = D0;
F = F0;

```

Nótese que para ejemplificar, los polos utilizados en el programa 6.2, son los de P1 (ver la línea tres) y será necesario cambiarlos según lo indique la tabla 6.1 y de acuerdo al escenario que se pretenda analizar.

6.5 GENERACIÓN DE RESIDUOS.

Para la fácil generación de residuos se recurrirá al diagrama 5.1 pero se cambiarán los valores por aquellos del sistema del motor de c.d. El diagrama 5.1 modificado se presenta a continuación con el nombre de diagrama 6.1 y 6.2. Se recuerda que el propósito de incluir los detalles de la simulación completa es para proporcionar material de utilidad para posibles investigadores futuros.

Para implementar el diagrama 6.2 solo hace falta decir que el bloque con la leyenda “State-Space” se alimenta con A, F, C, D y cero, respectivamente. Por otro lado, el bloque “State-Space1” del mismo diagrama se alimenta con A, B, C, D y cero, respectivamente.

6.6 SIMULACIÓN DE LAS PRUEBAS.

Durante todos los escenarios iniciaremos modificando el programa 6.1 y el 6.2 según sea el escenario (ver tabla 6.1), luego se correrán dichos programas con la intención de dejar los resultados en memoria. Después, se implementará el diagrama 6.1 haciendo las modificaciones convenientes (ver tabla 6.1) y se ejecutará la simulación con la intención de obtener los resultados de los residuos. Los resultados de dichos residuos se presentan a continuación para cada escenario:

6.6.1 Escenario E1. En el primer escenario se generará un residuo “A” con el observador de estados “A” para $G_0(s)$, considerando el par de polos reales P1 y aplicando las condiciones de observación simultánea. También se generará un residuo “B” con el observador de estados “B” para $G_0(s)$, considerando el par de polos reales P1. Se graficará la salida de los residuos “A” y “B” con respecto al tiempo para su análisis. Las gráficas se muestran en las figuras 6.4 y 6.5 respectivamente.

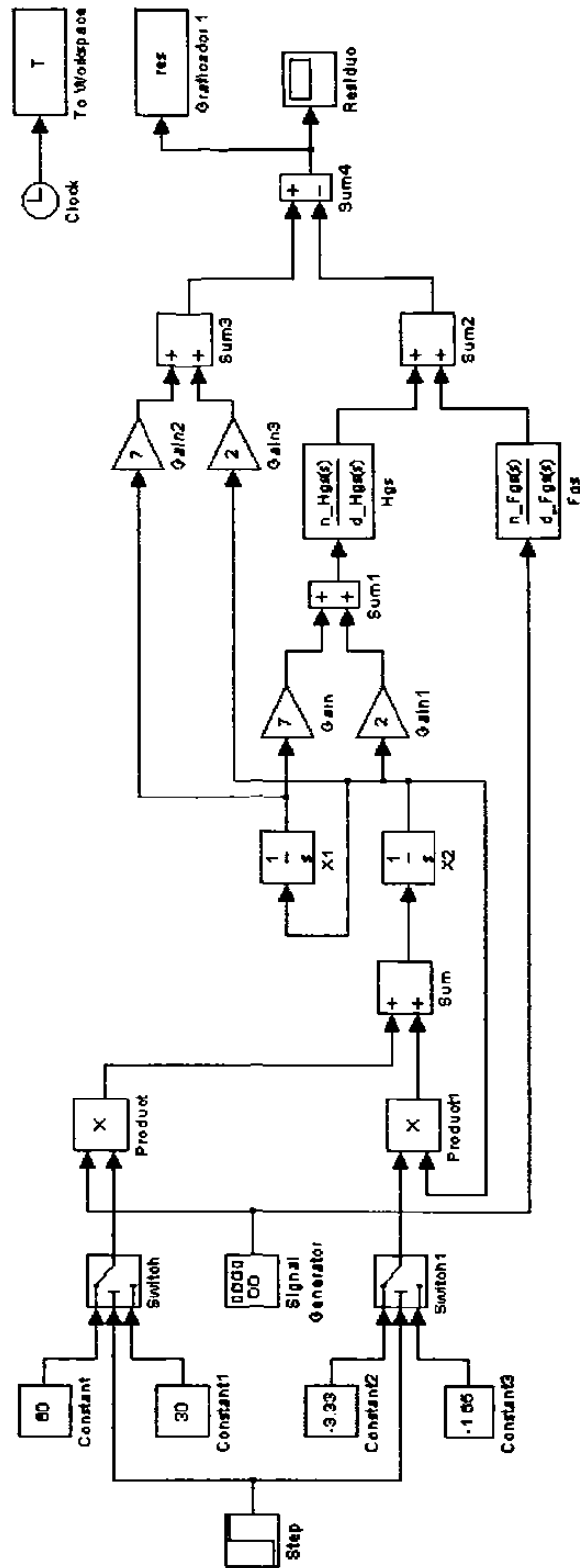


Figura 6.2 Diagrama que simula el residuo generado con un observador común para $G_0(s)$ y $G_1(s)$.

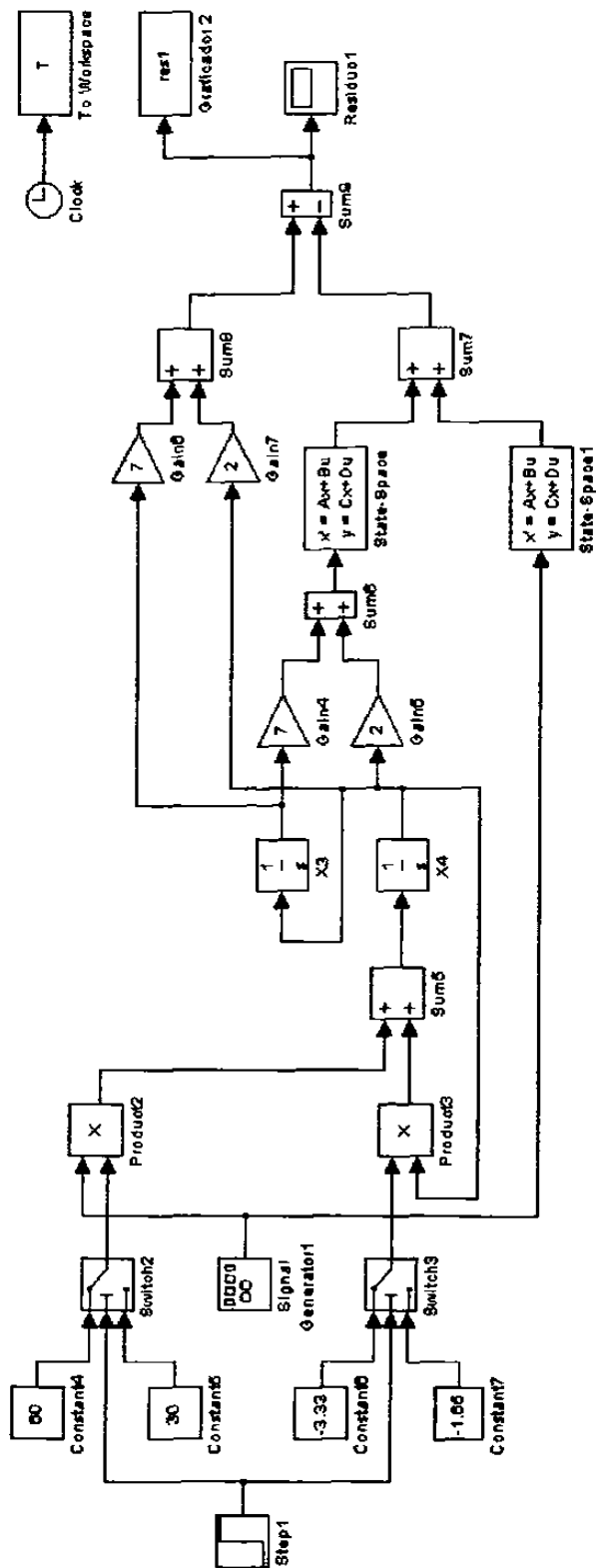


Figura 6.3 Diagrama que simula el residuo generado con un observador de estados para $G_0(s)$.

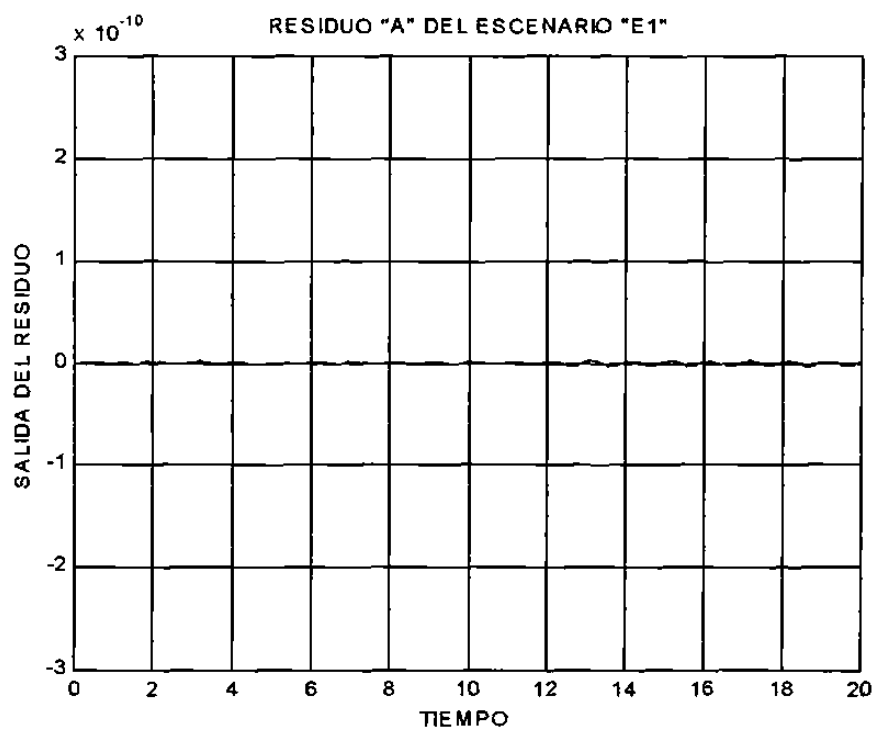


Figura 6.4 Gráfica del residuo A contra tiempo en E1.

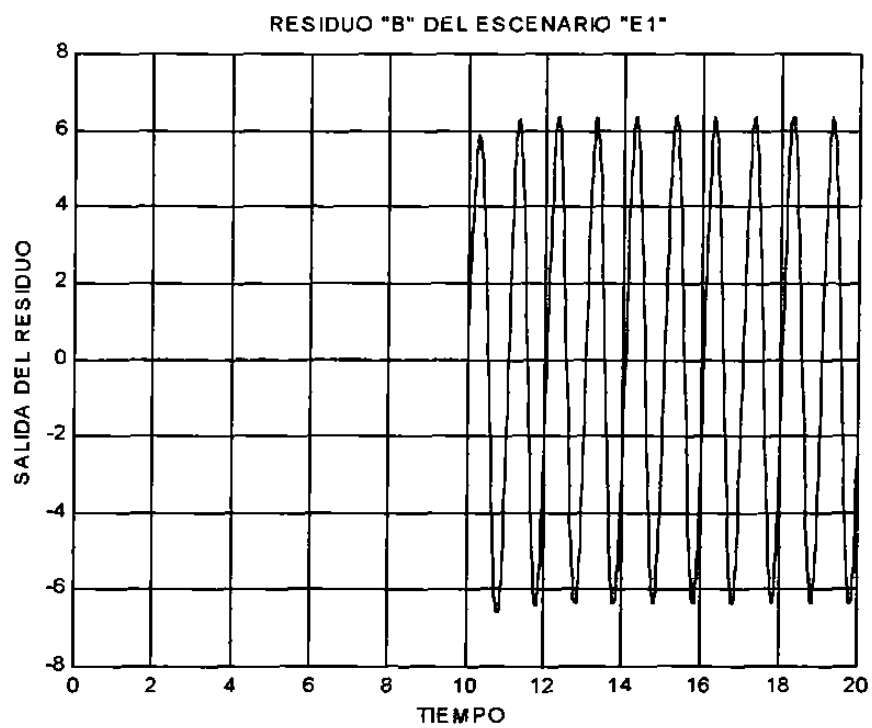


Figura 6.5 Gráfica del residuo B contra tiempo en E1.

Resultados para E1.- En la figura 6.4 aparece la curva que representa la salida del residuo "A", el cual fue insensible a la falla. En la figura 6.5 la curva representa la salida del residuo "B" y es fácil darse cuenta que al comienzo el residuo tiene un valor de cero pero después da evidencias de falla.

6.6.2 Escenario E2. En el segundo escenario se generará un residuo "A" con el observador de estados "A" para $G_0(s)$, considerando el par de polos reales P1 y aplicando las condiciones de observación simultánea. También se generará un residuo "B" con el observador de estados "B" para $G_0(s)$, considerando el par de polos reales P2. Se graficará la salida de los residuos "A" y "B" con respecto al tiempo para su análisis. Las gráficas se muestran en las figuras 6.6 y 6.7 respectivamente.

Resultados para E2.- Si se evalúan las curvas en las figuras 6.5 y 6.6, tal y como se hizo en las figuras 6.4 y 6.5, esta claro que los resultados son esencialmente iguales.

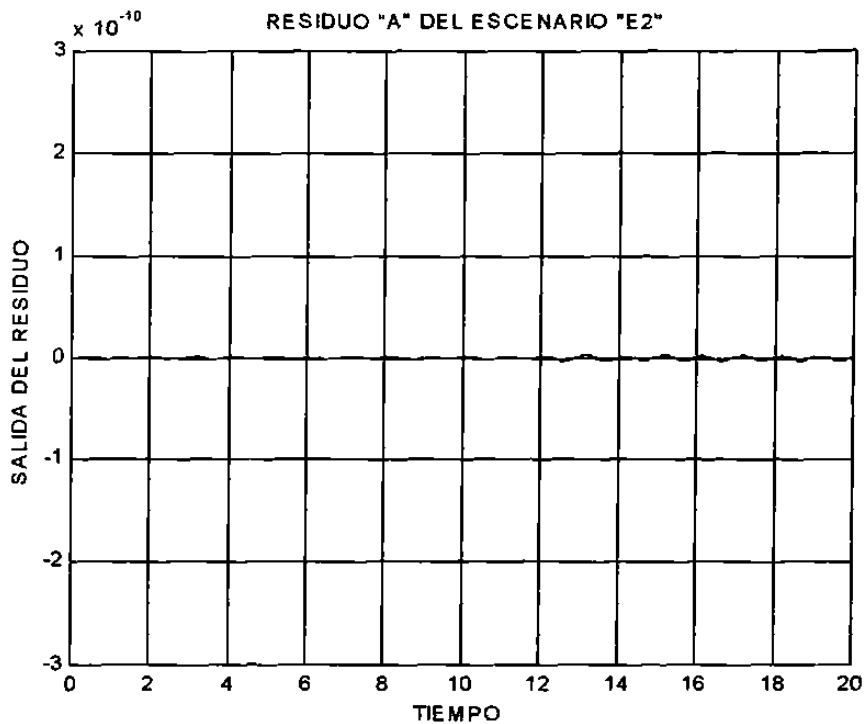


Figura 6.6 Gráfica del residuo A contra tiempo en E2.

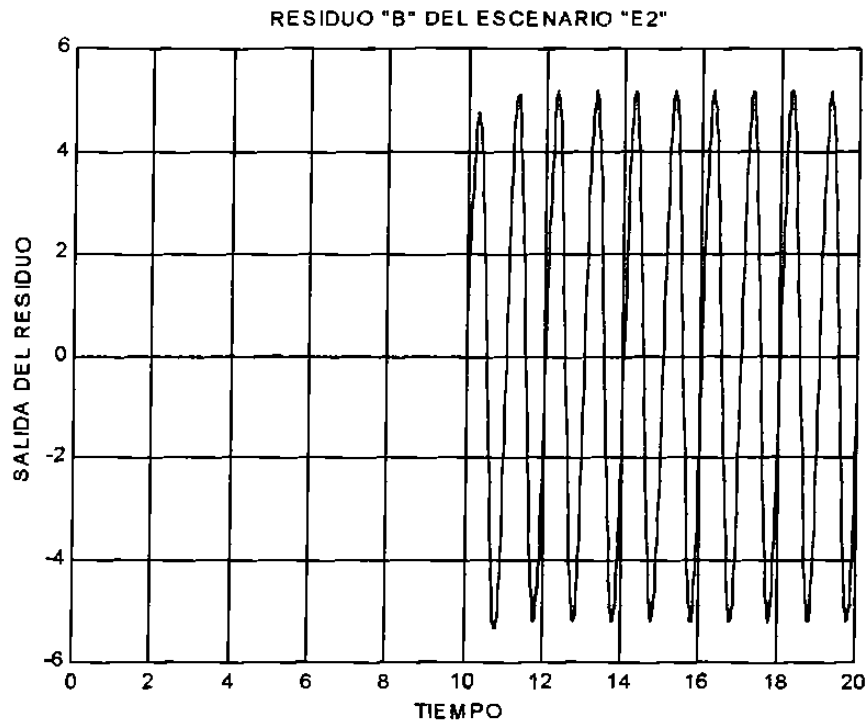


Figura 6.7 Gráfica del residuo B contra tiempo en E2.

6.6.3 Escenario E3. En el tercer escenario se generará un residuo "A" con el observador de estados "A" para $G_0(s)$, considerando el par de polos imaginarios P3 y aplicando las condiciones de observación simultánea. También se generará un residuo "B" con el observador de estados "B" para $G_0(s)$, considerando el par de polos imaginarios P3. Se graficará la salida de los residuos "A" y "B" con respecto al tiempo para su análisis. Las gráficas se muestran en las figuras 6.8 y 6.9 respectivamente.

Resultados para E3.- La evaluación de las curvas en las figuras 6.8 y 6.9 muestra esencialmente los resultados obtenidos en el escenario E1 y E2.

6.6.4 Escenario E4. En el cuarto escenario se generará un residuo "A" con el observador de estados "A" para $G_0(s)$, considerando el par de polos imaginarios P3 y aplicando las condiciones de observación simultánea. También se generará un residuo "B" con el observador de estados "B" para $G_0(s)$, considerando el par de polos

imaginarios P4. Se graficará la salida de los residuos "A" y "B" con respecto al tiempo para su análisis. Las gráficas se muestran en las figuras 6.10 y 6.11 respectivamente.

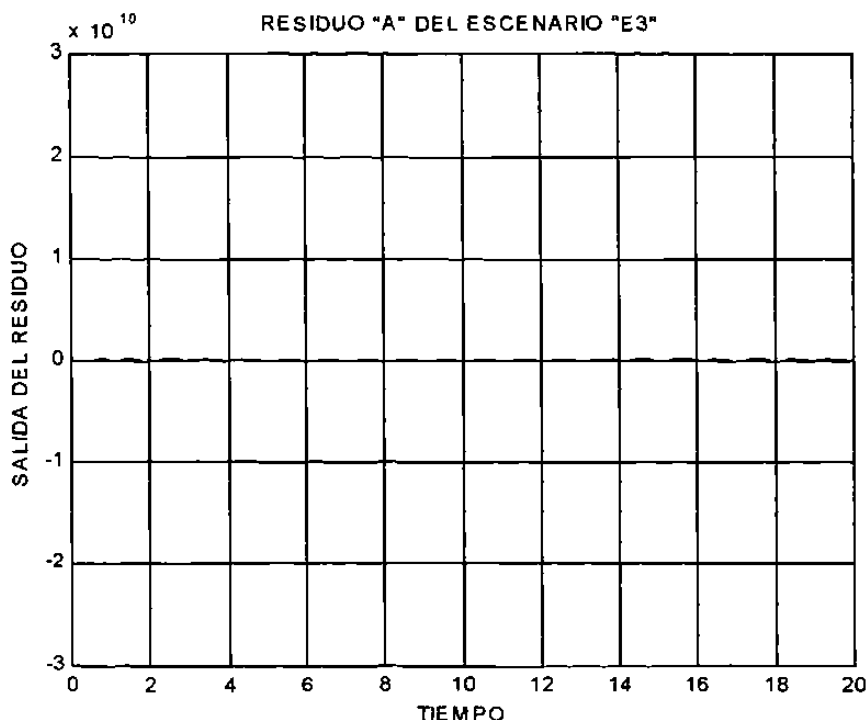


Figura 6.8 Gráfica del residuo A contra tiempo en E3.

Resultados para E4.- La evaluación de las curvas de las figuras 6.10 y 6.11 muestra esencialmente los resultados obtenidos en el escenario E1, E2 y E3.

6.6.5 Escenario E5. En el quinto escenario se generará un residuo "A" con el observador de estados "A" para $G_0(s)$, considerando el par de polos imaginarios P3 y aplicando las condiciones de observación simultánea. También se generará un residuo "B" con el observador de estados "B" para $G_0(s)$, considerando el par de polos imaginarios P1. Se graficará la salida de los residuos "A" y "B" con respecto al tiempo para su análisis. Las gráficas se muestran en las figuras 6.12 y 6.13 respectivamente.

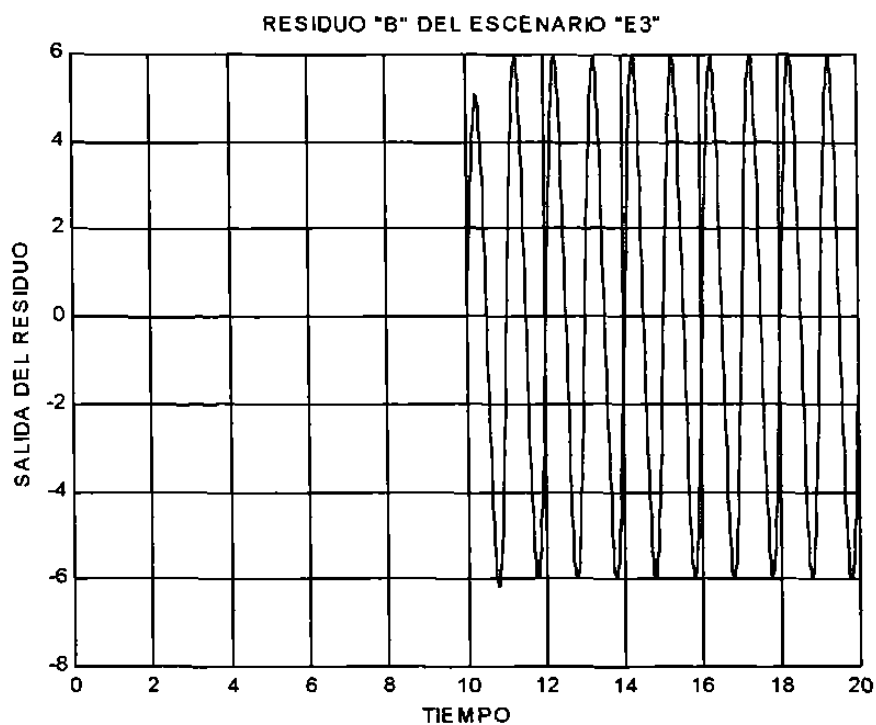


Figura 6.9 Gráfica del residuo B contra tiempo en E3.

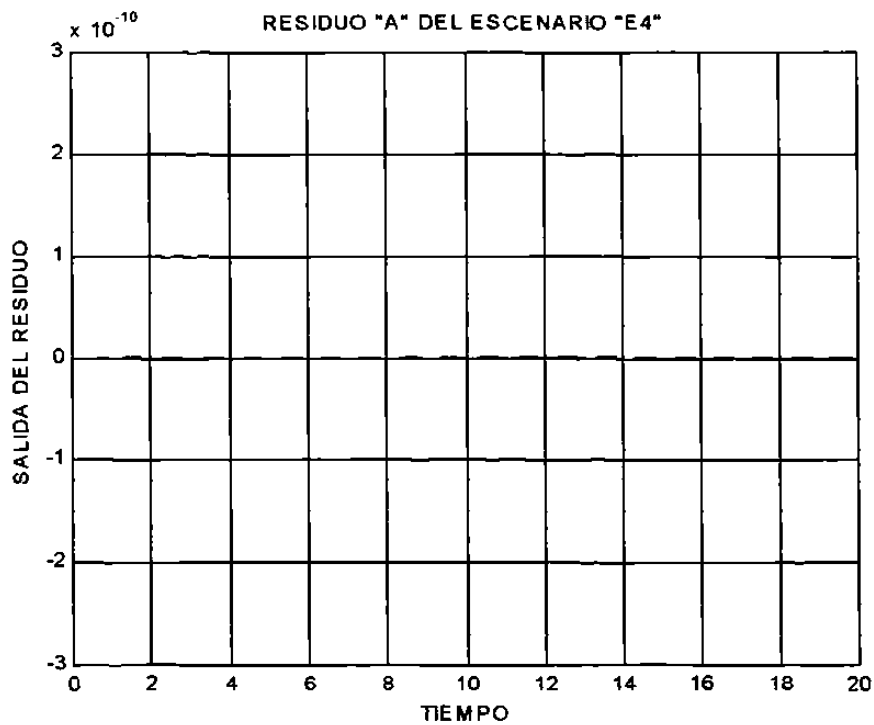


Figura 6.10 Gráfica del residuo A contra tiempo en E4.

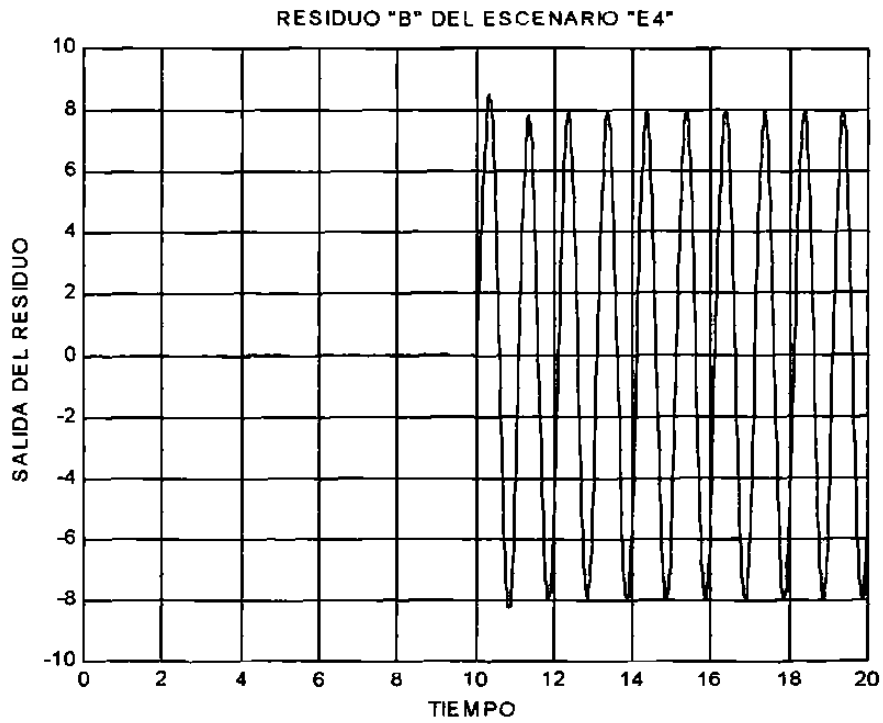


Figura 6.11 Gráfica del residuo B contra tiempo en E4.

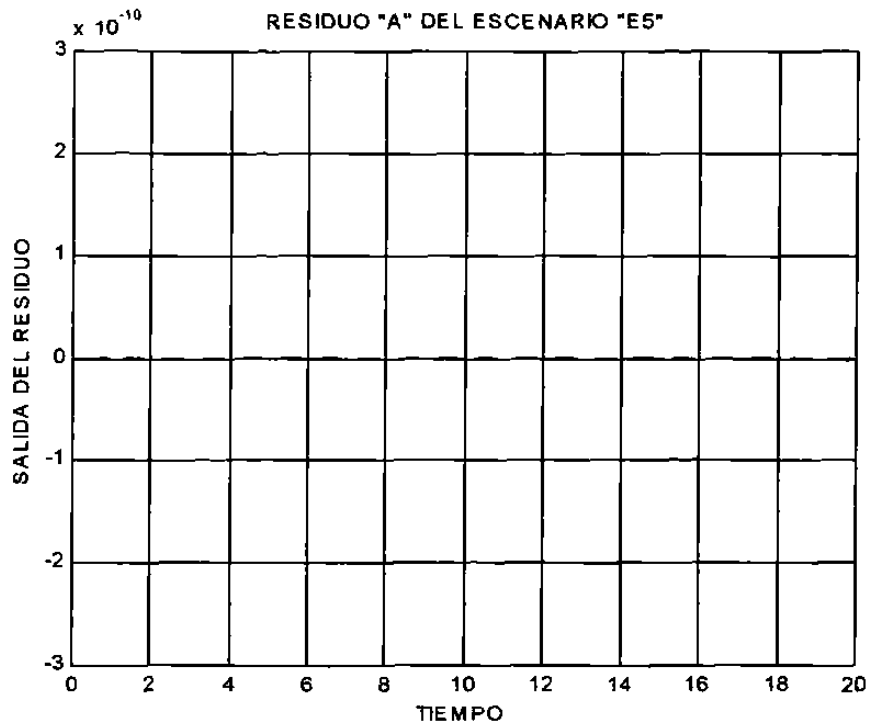


Figura 6.12 Gráfica del residuo A contra tiempo en E5.

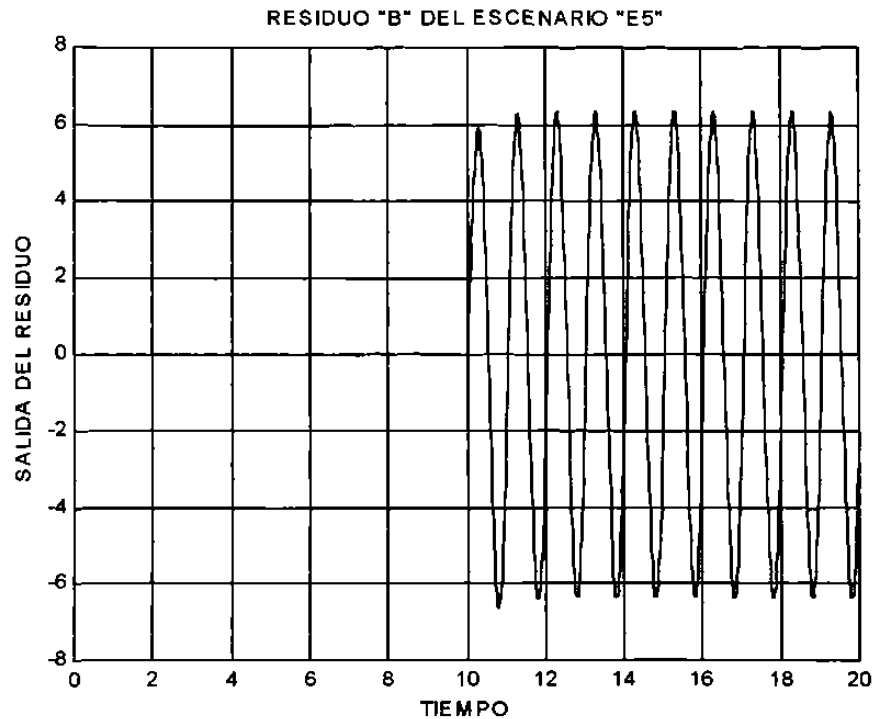


Figura 6.13 Gráfica del residuo B contra tiempo en E5.

Resultados para E4.- La evaluación de las curvas de las figuras 6.12 y 6.13 muestra esencialmente los resultados obtenidos en el escenario E1, E2, E3 y E4

6.6.6 Escenario E6. En el sexto escenario se generará un residuo "A" con el observador de estados "A" para $G_0(s)$, considerando el par de polos imaginarios P1 y aplicando las condiciones de observación simultánea. También se generará un residuo "B" con el observador de estados "B" para $G_0(s)$, considerando el par de polos imaginarios P3. Se graficará la salida de los residuos "A" y "B" con respecto al tiempo para su análisis. Las gráficas se muestran en las figuras 6.14 y 6.15 respectivamente.

Resultados para E4.- La evaluación de las curvas de las figuras 6.14 y 6.15 muestra esencialmente los resultados obtenidos en el escenario E1, E2, E3, E4 y E5.

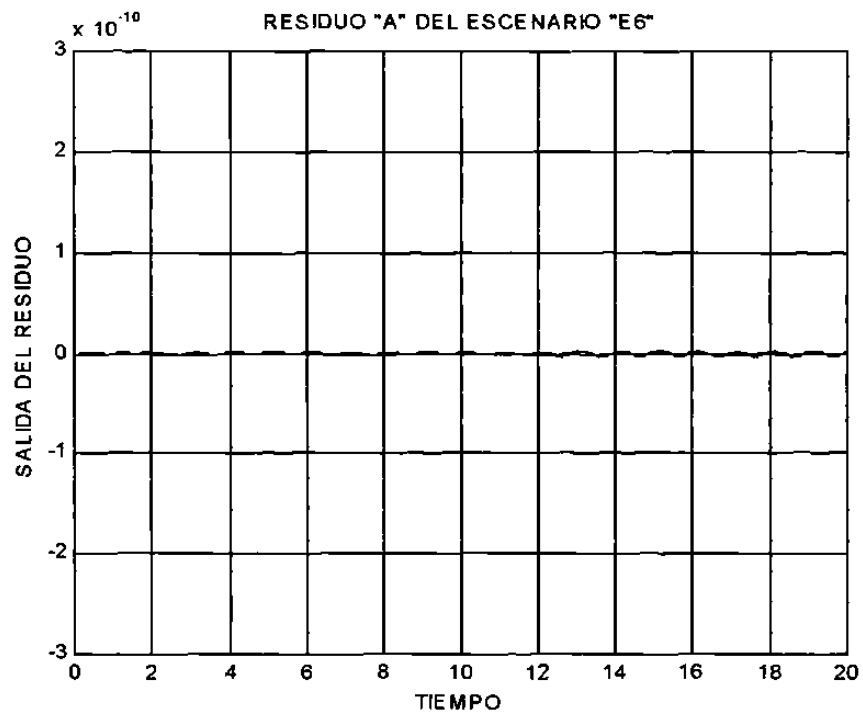


Figura 6.14 Gráfica del residuo A contra tiempo en E6.

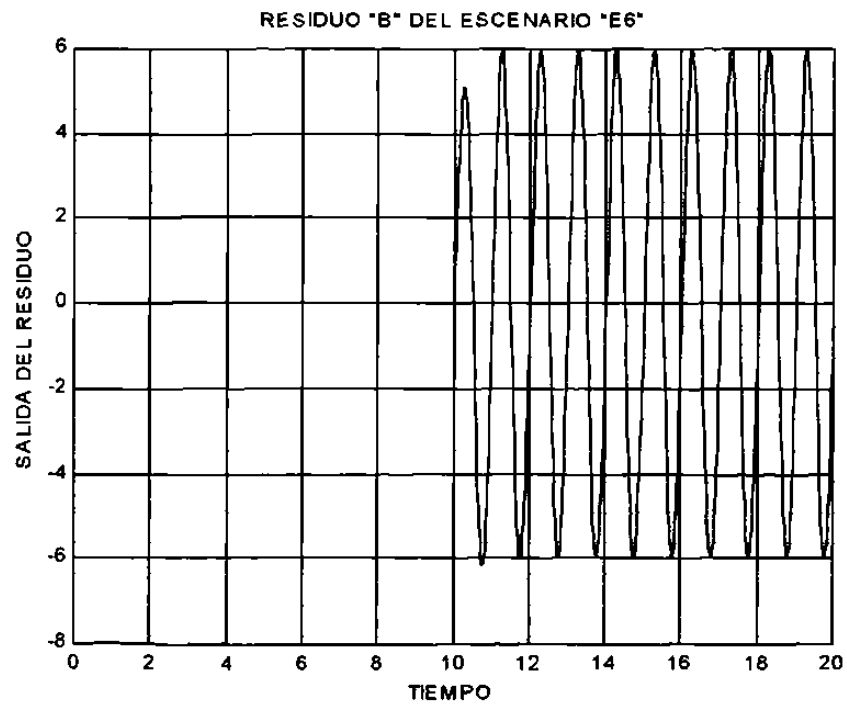


Figura 6.15 Gráfica del residuo B contra tiempo en E6.

6.7 CONCLUSIONES.

Meditando lo ocurrido en las pruebas anteriores, se puede resumir que se implementaron dos generadores de residuos “A” y “B” diseñados para una misma planta $G_0(s)$. Se realizó la simulación de ambos residuos en SIMULINK, de tal manera que se iniciara la simulación bajo condiciones normales de operación para $G_0(s)$, luego ocurrió un cambio repentino en las condiciones de operación de $G_0(s)$ originando una falla en el sistema, misma que fue detectada, sin excepción en los seis escenarios, por el residuo “B” pero no por el residuo “A”. En otras palabras el residuo “A” fue insensible a esta falla en particular y el residuo “B” resulto capaz de detectar dicha falla.

Las interrogante naturales que surge de estos resultados son ¿como se explica la insensibilidad del residuo “A”?, ¿es posible diseñar, o no, un generador de residuos sensible, al menos, a cierto tipo de fallas?, ¿y si es posible diseñarlo, como hacerlo?

La explicación a este hecho toma sentido en el fenómeno de la observación simultánea. Esta claro que la intención desde el inicio de la prueba fue:

- a) Generar un residuo “A” para un planta $G_0(s)$, a partir de la construcción de un observador de estados que cumpla con las condiciones de observación simultánea para dos plantas $G_0(s)$ y $G_1(s)$, donde $G_1(s)$ es la planta $G_0(s)$ pero en condiciones de falla.
- b) Generar un residuo “B” para un planta $G_0(s)$, a partir de la construcción de un observador de estados, común y corriente, para la planta $G_0(s)$.

Por lo tanto, se concluye que la insensibilidad del residuo “A” es debida a los efectos de la observación simultánea. También, se hace evidente que la clave para diseñar un generador de residuos sensible a cierto tipo de fallas, es cuidar el diseño del observador de estados, evitando la observación simultánea.

7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES.

En este trabajo se expuso un problema que esta latente en los generadores de residuos basados en observadores de estados. En particular se estudio la falta de sensibilidad a cierto tipo de fallas que presentan estos dispositivos. Este hecho es muy trascendente, pues como se explico, la rápida detección de fallas juega un papel importante tanto en monitoreo de fallas (mantenimiento preventivo) como en el desarrollo de sistemas tolerantes a fallas.

Cabe recordar que para hacer posible el desarrollo de este trabajo en primera instancia se recaudo la información necesaria para comprender la naturaleza del problema, es decir, se estudiaron los observadores de estado, la generación residual, la doble factorización coprima, entre otros. Después se propusieron metodologías para simplificar aquellas operaciones y simulaciones que hechas a mano tardarían demasiado tiempo en ser resueltas. Para la realización de dichas operaciones se desarrollaron

aplicaciones en MATLAB y SIMULINK, gracias a estas metodologías de simplificación fue posible deducir las siguientes conclusiones:

- a) Los generadores de residuos basados en observadores de estado son insensibles a cierto tipo de fallas.
- b) Las fallas que no se pueden detectar mediante la generación residual son del tipo multiplicativo y satisfacen condiciones de observación simultánea.
- c) El fenómeno descrito no solo ocurre en situaciones patológicas, en particular se mostró un ejemplo de una situación real en simulaciones.
- d) Es posible diseñar un generador de residuo sensible, al menos, a cierto tipo de fallas.

7.2 RECOMENDACIONES.

Dentro del trabajo que queda por hacer destacan principalmente dos puntos.

1. La caracterización matemática de las fallas que no se pueden detectar mediante un generador de residuos específico.
2. La solución al problema mencionado, es decir, encontrar si es posible detectar cualquier tipo de falla y como hacerlo.

BIBLIOGRAFÍA

[ALCORTA, 1999] E. Alcorta-García. “*Modellgestützte Residuengenerierung für die Diagnose von additiven und multiplikativen Fehlern in dynamischen Systemen, (en Alemania)*”. Dissertation, Gerhard Mercator University of Duisburg, Alemania, 1999.

[ALCORTA-FRANK, 1996] E. Alcorta-García and P. M. Frank. ‘*On the relationship between observer and parameter identification-based approaches to fault detection*’. En el Congreso *IFAC-World 1996*, volumen Ñ, páginas 25-29, Jul. 1996.

[BEAR, 1971] R. V. Beard. ‘*Failure Accommodation in Linear Systems Through Self-Reorganization*’. Ph.D. Dissertation, M.I.T., 1971

[CHEN-PATTON, 1994] J. Chen and R. J. Patton. “*A re-examination of fault detectability in linear dynamic systems*”. In Proc. *IFAC Symp. SAFEPROCESS '94, Expo Finlandia*, páginas 590-596, Jun. 1994.

[CHOW-WILLSKY, 1984] E. Y. Chow and A. S. Willsky. “*Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems*”. *IEEE Trans. En Control Autom.*, AC-29(7):603-614, Jul. 1984.

[DING, 1992] X. Ding. ‘*Frequenzbereichsverfahren zur beobachtergestuetzten Fehlerentdeckung*’. Vdi-Verlag, Reihe 8, Nr. 295, Duesseldorf, Alemania, 1992.

[DING-ET. AL., 1991] X. Ding, P. M. Frank, and L. Guo, "Robust observer design for dynamical system under unknown disturbances," in *Proc. Primer Symposium IFAC. Design Methods Contr. Syst.*, Eth Zurich, Switzerland, 1991, pp. 290-295.

[DING-FRANK, 1990] X. Ding and P. M. Frank, "Fault detection via factorisation approach," *Syst. Cont. Lett.*, vol. 14, pp. 431-436, 1990.

[FRANK-ET. AL., 1997] P. M. Frank, E Alcorta-García, and B. Köppen-Seliger. "Modelling for faultdetection and isolation". *Cosy'97*, Budapest, Hungria, Oct. 1997.

[FRANK, 1996] P. M. Frank. "Analysis and qualitative model-based fault diagnosis – a survey and some new results". *European Jouranl of Control*, 2(1):6-28, 1996.

[FRANK, 1994] P. M. Frank. "On line default detection in uncertain nolinear systems using diagnostic observers: a survey". *Int. J. Systems Sci.*, 25(12):2129-2154, 1994.

[FRANK, 1990] P. M. Frank. "Fault diagnosis in dynamic system using analytical and knowledge-based redundancy – a survey". *Automática*, 26:459-474, 1990.

[GE-FANG, 1988] W. Ge and C. Z. Fang. "Detection of faulty components via robust observation". *Int. J. Control*, 47(2):581-599, 1988.

[GELTER, 1993] J. Gelter. "Model based fault diagnosis". *Teoría de Control y Tecnología Avanzada*. 9(1):259-285, 1993.

[HOU-MÜLLER, 1994] M. Hou and P. C. Müller. "Fault detection and isolation observers. *Int. J. of Control*", 60:827-846, 1994.

[ISERMANN, 1984] R. Isermann. "*Process fault detection based on modelling and estimation methods-A survey*". *Automatica*, 20:387-404, 1984.

[OGATA, 1998] Katsuhiko Ogata. "*Ingeniería de Control Moderna*", 3ª. Ed. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1998.

[MASSOUMNIA, 1986] M. Massoumnia. "*A geometric approach to the synthesis of failure detection filters*". *IEEE Trans. En Control Autom.*, AC-31(9):839-846, Sep. 1986.

[N.C.D.F., 1999] "*Notas del Curso de Detección de Fallas*" por el Dr. Efraín Alcorta García, en la Universidad Autónoma de Nuevo León (FIME), Dic. 1999.

[REILLY, 1983] J. O'Reilly, "*Observer for Linear Systems*". Londres: Academia, 1983.

[PARK-RIZZONI, 1994] J. Park and G. Rizzoni. "*A new interpretation of the fault detection filter: Part 1. closed-form algorithm*". *Int. Journal of Control*, 60(5):767-787, 1994.

[PATTON,] R. J. Patton. "*Robust model-based fault diagnosis*": the state of the art. In *Proc. IFAC Symp. SAFEPROCESS '94, Expo Finland*, páginas 1-24, Jun. 1994.

[SACKS-MURRAY, 1982] P. Sacks and J. Murray, "*Fractional representation, algebraic geometry and the simultaneous stabilization problem*", *IEEE Trans. Control Autom.*, vol. AC-27, pp. 895-903, 1982.

[VIDYASGAR, 1985] M. Vidyasgar, "*Control Systems Synthesis: A Factorization Approach*". Cambridge, MA: MIT: Press, 1985.

[VIDYASGAR-ET. AL., 1982] M. Vidyasgar and N. Viswanadham, “*Algebraic design techniques for reliable stabilization,*” *IEEE Trans. Control Autom.*, vol. AC-27, pp. 1085-1095, 1982.

[WILLSKY, 1976] A. S. Willsky. “*A survey of design methods for failure detection in dynamic systems*”. *Automática*, 12:601-611, 1976.

[WÜNNENBERG, 1990] J. Wünnenberg. “*Observer-Based Fault Detection in Dynamic Systems*”. VDI-Fortschrittsber., VDI-Verlag, Reihe 8, Nr. 222, Düsseldorf, Alemania, 1990.

[YAO-ET. AL., 1995] Y. X. Yao, M. Darouach, and J. Schaefer. “*Simultaneous observation of linear systems*”. *IEEE Trans. En Control Autom.*, 40(4):696-699, Abr. 1995.

LISTADO DE TABLAS

TABLA	TÍTULO	PÁGINA
6 . 1	Tabla que muestra los seis escenarios de prueba para cada caso.	49

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA	TÍTULO	PÁGINA
2 . 1	Diagrama que representa la configuración.	8
2 . 2	Representación de un sistema LTI.	9
2 . 3	Representación alternativa de un sistema LTI.	9
2 . 4	Compensación de la entrada $u(t)$ de un sistema LTI.	9
2 . 5	Observador de Luenberger.	10
2 . 6	Diagrama de un observador de estado.	16
5 . 1	Diagrama a implementar en SIMULINK	42
5 . 2	Gráfica de la salida del observador de estados.	43
5 . 3	Gráfica de la salida del residuo.	44
6 . 1	Circuito de un motor de C.D. conectado a una carga.	46
6 . 2	Diagrama que simula el residuo generado con un observador común para $G_0(s)$ y $G_1(s)$.	53
6 . 3	Diagrama que simula el residuo generado con un observador de estados para $G_0(s)$.	54
6 . 4	Gráfica del residuo A contra tiempo en E1.	55
6 . 5	Gráfica del residuo B contra tiempo en E1.	55
6 . 6	Gráfica del residuo A contra tiempo en E2.	56
6 . 7	Gráfica del residuo B contra tiempo en E2.	57
6 . 8	Gráfica del residuo A contra tiempo en E3.	58
6 . 9	Gráfica del residuo B contra tiempo en E3.	59

6 . 10	Gráfica del residuo A contra tiempo en E4.	59
6 . 11	Gráfica del residuo B contra tiempo en E4.	60
6 . 12	Gráfica del residuo A contra tiempo en E5.	60
6 . 13	Gráfica del residuo B contra tiempo en E5.	61
6 . 14	Gráfica del residuo A contra tiempo en E6.	62
6 . 15	Gráfica del residuo B contra tiempo en E6.	62

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

- Grado a alcanzar:

Grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Control.

- Título de la tesis:

Análisis de la Falta de Detectabilidad de Fallas de los Métodos de Diagnóstico Basados en Observadores de Estado.

- Rama profesional:

Ingeniería Eléctrica y de Control.

- Lugar y fecha de nacimiento:

Monterrey, Nuevo León; 16 de agosto de 1974.

- Nombre de los padres:

Sr. Ing. Reyes Gámez Rodríguez

Sra. María Guadalupe Lozano de Gámez

- Graduado de la UANL:

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

- Título:

Ingeniero Mecánico y Eléctrico.

- Experiencia profesional:

2000 – 2001 *Proyectos y Servicios Industriales, S.A. de C.V.*

Supervisor de obra electromecánica.

1999 – 2000 *Anticorrosivos y Consultoría, S.A. de C.V.*

Residente de construcción.

1997 – 1998 *Hylsa, S.A. de C.V.*

Coordinador de ingeniería eléctrica y control.

1994 – 1995 *Galvak, S.A. de C.V.*

Prácticas profesionales.

1994 – 1995 *Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica*

Becario en el depto. de máquinas eléctricas.

