

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



DIAGNÓSTICO DE FALLAS BASADO EN
OBSERVADORES CON CONVERGENCIA EN TIEMPO
FINITO

POR

FRANCISCO EDUARDO LÓPEZ CASTILLO

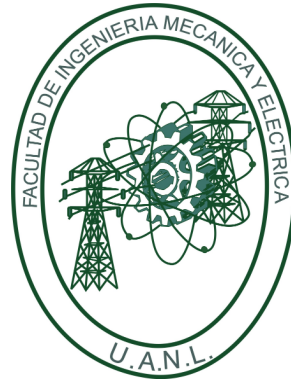
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA

24 DE JULIO DE 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



DIAGNÓSTICO DE FALLAS BASADO EN
OBSERVADORES CON CONVERGENCIA EN TIEMPO
FINITO

POR

FRANCISCO EDUARDO LÓPEZ CASTILLO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA

24 DE JULIO DE 2015

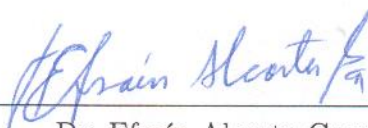
Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Diagnóstico de fallas basado en observadores con convergencia en tiempo finito», realizada por el alumno Francisco Eduardo López Castillo, con número de matrícula 1339941, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica

El Comité de Tesis



Dr. Efraín Alcorta García

Asesor



Dr. David A. Díaz Romero

Revisor

Dr. Alejandro Rodríguez Solís

Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirección de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 23 de julio de 2015

A mi familia por el apoyo incondicional, a mis padres por su motivación, a mis hermanos por sus comentarios y en especial a mi abuelo por sus palabras acerca de tener un mejor futuro basado en el estudio.

A mi Director de tesis, el Dr. Efraín Alcorta García, por su paciencia, sus consejos y sabiduría además de que nunca dejo de creer en mí y me mostro que el esfuerzo y perseverancia tienen resultados.

A los Profesores que conocí como alumno del Posgrado en Ingeniería Eléctrica por transmitirme sus conocimientos. A mis compañeros de clase David, Edwin y Otoniel por compartir el tiempo y esfuerzo.

A las demás personas fuera de el ámbito estudiantil que me motivaron para terminar mis estudios.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por ser mi segunda casa por todos estos años.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado durante mis estudios de maestría.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	x
1. Introducción	1
1.1. Hipótesis	3
1.2. Objetivos del trabajo	4
1.2.1. Objetivos particulares	4
1.3. Metodología	4
2. Planteamiento del problema	6
2.1. Preliminares	6
2.1.1. Diagnóstico de fallas	6
2.1.2. Generacion residual	7
2.1.3. Enfoque de espacio de paridad	8
2.1.4. Enfoque de Observador dedicado	9
2.1.5. Desición sobre presencia de fallas y su aislamiento	12
2.2. Formulación del problema	13

3. Solución Propuesta	14
3.1. Observadores con convergencia de tiempo finito	14
3.2. Observadores con entradas desconocidas	16
3.2.1. Observador de orden reducido con entradas desconocidas . . .	16
3.2.2. Observador de orden completo con entradas desconocidas . . .	19
3.3. Procedimiento de diseño propuesto	21
4. Ejemplo de aplicación	24
4.1. Modelo del sistema	24
4.2. Diseño de la detección y localización de falla	27
4.2.1. Paso 1: Diseño de las matrices de los generadores de residuos robustos	27
4.2.2. Paso 2: Observador con convergencia en tiempo finito	30
4.2.3. Paso 3: Construcción del estado estimado	33
4.2.4. Paso 4: Construcción del residuo	33
4.3. Resultado de simulacion	34
4.3.1. Resultados de simulación, Caso 1	34
4.3.2. Resultados de simulación, Caso 2	35
4.3.3. Resultados de simulación, Caso 3	35
4.3.4. Resultado de simulación, Caso 4	37
4.3.5. Resultados de simulación, Caso 5	38

5. Conclusiones

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Esquema de diagnóstico de fallas.	7
2.2. Esquema de diagnóstico de fallas utilizando espacio de paridad.	8
2.3. Esquema de generación residual.	10
3.1. Estructura del observador con convergencia en tiempo finito	15
3.2. Esquema de generador residual basado en observadores	16
4.1. Respuesta del sistema nominal	26
4.2. Posiciones angulares del sistema sin fallas	35
4.3. Residuo robusto a perturbaciones con convergencia asintótica	36
4.4. Residuo robusto a perturbaciones con convergencia finita	36
4.5. Amplificación de la escala de tiempo del residuo robusto a perturbaciones con convergencia finita	37
4.6. Residuo asintótico con falla en $t = 1$ segundo.	38
4.7. Residuo convergente en tiempo finito con falla en $t = 1$ segundo.	39
4.8. Residuo asintótico con falla en $t = 7$ segundos.	39
4.9. Residuo con convergencia finita con falla en $t = 7$ segundos.	40

ÍNDICE DE TABLAS

4.1. Casos de estudio considerados	34
--	----

RESUMEN

Francisco Eduardo López Castillo.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: DIAGNÓSTICO DE FALLAS BASADO EN OBSERVADORES CON
CONVERGENCIA EN TIEMPO FINITO.

Número de páginas: 46.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: El objetivo general del trabajo es el de desarrollar un procedimiento de diseño de algoritmo de diagnóstico de fallas basado en observadores con convergencia en tiempo finito. Así mismo, los objetivos particulares son los siguientes: Primero es el revisar el estado del arte del diagnóstico de fallas basado en observadores; segundo, realizar una propuesta de diseño de generador de residuos que tenga convergencia en tiempo finito; tercero, programación del procedimiento de diseño propuesto en un software de simulación; cuarto, la implementación y prueba de algoritmo propuesto así como la comparación con un generador residual convencional.

Como método de estudio se realizará primero una revisión profunda de la generación residual y de la convergencia en tiempo finito. Basado en este conocimiento

y comprensión, se revisarán las ventajas y limitaciones para poder así hacer una propuesta de variante para buscar la manera de un algoritmo que pueda mejorar el desempeño y de realizar generación residual con convergencia en tiempo finito.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: La contribución principal del trabajo es un algoritmo para el diseño de generadores de residuos de orden completo con convergencia en tiempo finito, el cual es robusto a entradas desconocidas. El algoritmo propuesto permite obtener una solución sencilla al problema, la comprensión del algoritmo permite el manejo de problemas mas amplios, con tal de que el error de estimación sea lineal.

El contar con generador de residuos con convergencia en tiempo finito permite aumentar la confiabilidad del algoritmo de diagnóstico, esto al poder prescribir el tiempo en el que el generador de residuos converge y a partir del cual las variaciones pueden ser relacionadas directamente con las fallas. El aumento de robustez usando generación residual de orden completo permite el manejo de un número aplio de sistemas. A partir de los resultados se puede concluir que la característica de convergencia en tiempo finito debe de ser una cualidad a ser incluida en cualquier diseño de generador residual con fines de implementación.

Firma del asesor: _____

Dr. Efraín Alcorta García

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La naturaleza de los sistemas industriales los hace susceptibles a fallas en sus componentes. Estas fallas pueden ocurrir por envejecimiento, fallas de los materiales o por estrés en el funcionamiento por operación fuera de los límites de diseño, etc. Paros en la producción debidos a fallas, es decir, paros no programados, pudiera dar origen a un gran monto de pérdidas en el sector industrial.

Una falla se entiende como cualquier clase de malfuncionamiento en un sistema dinámico real. Esto lleva a una anormalidad indeseable en el desempeño del sistema. Para fines prácticos, una falla es entendida como un cambio en el valor de un parámetro fuera de los límites de tolerancia. Note que esta definición representa un problema, pues un mismo cambio puede significar una variación tolerable (no es una falla) o bien una falla, dependiendo del contexto donde esta se presente.

Las fallas pueden ocurrir en cualquier parte de un sistema, como por ejemplo, en los sensores, en los actuadores o bien en algún componente del proceso en si. Para fines de diagnóstico de fallas, una clasificación que dio origen a una gran cantidad de trabajos es la consideración de una zona específica para realizar el diagnóstico: de instrumento, de actuador y de componente. Por otra parte, la falla pudiera ser calificada como multiplicativa, esto si la falla esta multiplicando a la entrada o al estado, o aditiva si la falla se representa como una entrada adicional al sistema.

Note que una falla en sensor, en actuador o en componente pudiera ser aditiva o bien multiplicativa dependiendo en la manera como esta representada en el modelo (multiplicando a un estado o entrada, sería multiplicativa; si es una entrada adicional, representa una aditiva).

Cabe aclarar que diagnóstico de una falla implica: su detección, es decir, revisar cuando una falla ocurre; el aislamiento, es decir, donde ocurre la falla; así como la identificación, es decir, determinar la magnitud y característica de la falla.

Para una representación real con respecto al uso de un sistema de diagnóstico de falla el modelado de todos los efectos que pueden llevar a una alarma que corresponde a la presencia de falla o bien a falsa alarma de fallo. Tales efectos son:

1. Fallas en el actuador o en los componentes de la dinámica de la planta, o en los sensores. En este caso la alarma corresponde bien al motivo por el cual se diseñó.
2. Errores de modelado entre el sistema actual y su modelo matemático, esto puede ser una fuente de alarmas falsas.
3. Ruido del sistema o ruido de medición. Esto frecuentemente es también una fuente de alarmas falsas.

El diagnóstico de fallas basado en modelos se ha consolidado en los últimos años debido a las exigencias de seguridad y confiabilidad en la industria. Existen diferentes formas de llevar a cabo el diagnóstico de fallas. Una de las técnicas ampliamente reportadas en la literatura hace uso de observadores de la salida. El uso de observadores de Luenberger o bien modificaciones robustas de este (como los observadores con entradas desconocidas) para la salida de un sistema así como las variantes para sistemas no lineales de estos tienen convergencia asintótica del error. En esta forma de convergencia se argumenta frecuentemente que el radio de convergencia es arbitrario, es decir, mediante la ubicación de polos se puede lograr. Sin embargo, siempre se dependerá del valor de la condición inicial y no se puede saber de antemano cuanto

tiempo tardará en converger el residuo, claro, a menos que se tenga información de las condiciones iniciales.

Un problema que se plantea con frecuencia es el de saber si una falla ocurre mientras el observador se encuentra convergiendo, es decir, mientras que el error debido a las condiciones iniciales todavía no se hace lo suficientemente pequeño como para no confundirlo con el efecto de una falla. Una posible solución a este problema es el uso de una técnica no lineal, conocida como modos deslizantes, la cual puede garantizar convergencia del observador y por lo tanto del error de estimación a cero en tiempo finito.

En este trabajo, a diferencia de los enfoques inspirados en técnicas de modos deslizantes, se pretende utilizar los resultados reportados en la bibliografía, los cuales utilizan solo técnicas lineales, para diseñar un generador de residuos con convergencia en tiempo finito.

1.1 HIPÓTESIS

Con la finalidad de establecer el marco de referencia para este trabajo se procede a poner en consideración la siguiente hipótesis:

Es posible establecer de antemano el tiempo a partir del cual el generador de residuos es confiable mediante el uso de técnicas lineales robustas frente a incertidumbre del modelo.

La hipótesis esta fundamentada en la existencia de resultados para la observación con convergencia en tiempo finito de sistemas lineales reportados en [8]. Para la parte de robstez se consideran observadores con entradas desconocidas.

1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO

Para verificar la hipótesis anterior se considera el siguiente objetivo:

Desarrollar un procedimiento de diseño de algoritmos de diagnóstico robusto de fallas basado en observadores con convergencia finita

Claramente el objetivo es verificar que la hipótesis es correcta. La verificación se realizará de manera constructiva, en forma de algoritmo de diseño.

1.2.1 OBJETIVOS PARTICULARES

Para alcanzar el objetivo, se plantean una serie de objetivos particulares.

1. *Revisión del estado del arte en el diagnóstico de fallas utilizando observadores con énfasis en la forma de convergencia que poseen.*
2. *Propuesta de un diseño de generador de residuos que tenga convergencia en tiempo finito.*
3. *Programación del procedimiento de diseño en un software de simulación.*
4. *Implementación y prueba de algoritmo propuesto así como comparación de desempeño con respecto a generadores de residuos convencionales.*

1.3 METODOLOGÍA

La forma de abordar el problema considerarlo y buscar una solución es transitando primero los elementos conocidos de soluciones previas. Sobre esta base se propone un algoritmo que unifique las diferentes soluciones parciales existentes. Los pasos seguidos se pueden resumir en los siguientes:

1. Se realizara una revisión del estado del arte del diagnóstico y aislamiento de fallas. Aquí se hace énfasis en revisar las características de convergencia de los métodos existentes.
2. Revisión de algoritmos que brindan convergencia en tiempo finito así como de los algoritmos que permiten observar la salida aún en la presencia de entradas desconocidas.
3. Desarrollo de propuesta de algoritmo de diseño de generadores de residuo robustos con convergencia en tiempo finito.
4. Verificación mediante simulación del algoritmo propuesto así como comparación con resultados disponibles en la literatura.

CAPÍTULO 2

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este capítulo se considera la formulación del problema bajo consideración en el trabajo. Para poder presentar el problema de manera apropiada, se hace una breve recapitulación de los procedimientos de diagnóstico de fallas cuando se utilizan observadores.

2.1 PRELIMINARES

El concepto de diagnóstico de fallas es aclarado a detalle. Esto establece el marco en el cual se desarrolla la tesis. Cabe aclarar que serán presentados los conceptos generales relacionados con el diagnóstico de fallas utilizando observadores.

2.1.1 DIAGNÓSTICO DE FALLAS

El diagnóstico de fallas se refiere al procedimiento para obtener toda la información sobre una falla que ocurre en un sistema [9], esto es, determinar cuando la falla ocurre, donde ocurre y cual es su magnitud, tiempo de ocurrencia, etc.

Siguiendo a [9] (ver también [4], [7], [11]), el diagnóstico de fallas se puede

realizar siguiendo tres pasos:

1. **Generación de Residuos.** Se diseñan filtros de tal forma que la señal obtenida es independiente de los cambios de la entrada y/o perturbaciones. Es decir, se obtienen señales que solo dependen de las fallas.
2. **Evaluación residual.** Aquí se determina cuando una falla ocurrió y eventualmente también su origen.
3. **Identificación.** Se obtiene información sobre la falla, tal como su magnitud, tiempo de ocurrencia, etc.

Una representación esquemática del diagnóstico puede ser apreciada en la figura 2.1.

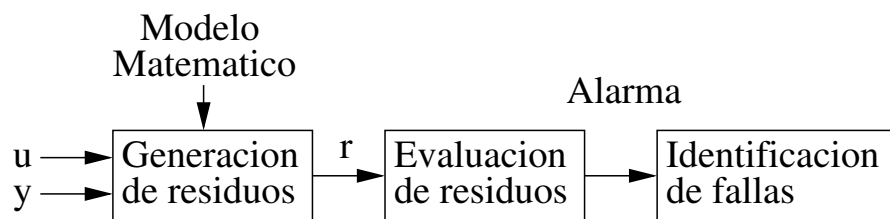


Figura 2.1: Esquema de diagnóstico de fallas.

2.1.2 GENERACION RESIDUAL

Métodos de Generación de Residuos

1. Enfoque de espacio de paridad.
2. Enfoque de observador dedicado y enfoque basado en innovación.
3. Enfoque de filtro de detección de falla.
4. Enfoque de identificación de parámetros.

2.1.3 ENFOQUE DE ESPACIO DE PARIDAD

La idea principal es checar la paridad (consistencia) de las ecuaciones matemáticas del sistema (relaciones) de redundancia analítica al usar mediciones actuales. Un esquema de espacio de paridad entrada salida es mostrado en figura 2.2.

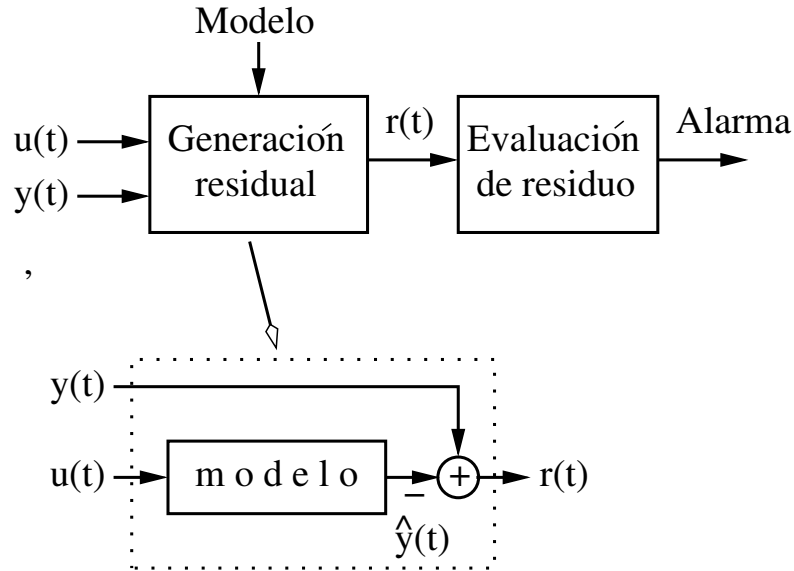


Figura 2.2: Esquema de diagnóstico de fallas utilizando espacio de paridad.

Una falla es declarada al ocurrir un error en la consistencia que sobrepase un umbral determinado.

Hay básicamente 2 funciones de relación de paridad para obtener redundancia analítica:

1. **Redundancia directa:** Relación entre sensores redundantes, esto es instantáneo en la salida, sin considerar la dinámica del sistema.
2. **Redundancia temporal:** Relaciones redundantes dinámicas entre las salidas de los sensores y las entradas a los actuadores (ecuaciones diferenciales o ecuaciones en diferencias)

La principal ventaja de este esquema es la simplicidad y facilidad de implementación.

2.1.4 ENFOQUE DE OBSERVADOR DEDICADO

Muchos autores se han considerado el problema de FDI utilizando un enfoque basado en un simple observador o bien con un banco de observadores de Luenberger o filtros de Kalman. Este esquema fue propuesto inicialmente por [5] y una simplificación puede ser encontrada en [1]

La idea básica del enfoque de un observador es el reconstruir la salida del sistema a partir de la medición o conjuntos de mediciones con la ayuda de los filtros de Kalman usando un error de estimación o innovación respectivamente como un residuo para realizar la detección y aislamiento de fallas.

Note que un observador de orden completo simplemente consiste en un modelo en paralelo de el proceso con un factor de corrección basado en el error de estimación de la salida $e(t) = y(t) - \hat{y}(t)$.

Así, en principio el modelo en lazo abierto también podría funcionar (es el principio del espacio de paridad), la retroalimentación, es decir, el factor de corrección es importante debido a varias razones, como lo son:

1. Compensar por diferencias en condiciones iniciales.
2. Permitir la estimación de un sistema inestable.
3. Proveer libertad de diseño en el filtro, por ejemplo al desacoplo de los efectos de falla de los efectos de otras fallas.

La tarea básica del diseño de estimadores de estado para la identificación y aislamiento de falla es el optimizar al proponer una buena elección de la matriz de ganancia H .

La configuración más simple usada en la detección de falla de instrumentos es un estimador simple, donde un observador de orden reducido o total es manejado por un solo sensor de salida. La comparación entre la salida actual y la salida estimada usando una lógica, en principio, da una única detección y aislamiento de una falla de un instrumento. La ocurrencia de la falla es monitoreada por un test de innovación estadístico con vista, media y covarianza [7].

En este trabajo se planteó como punto de inicio el uso de técnicas de diagnóstico basadas en observadores, es decir, la forma de obtener los residuos es mediante observadores. La forma más común para definir un residuo es mediante el error de estimación de la salida.

Es claro que si el modelo es conocido perfectamente (no hay incertidumbre) y no hay perturbaciones externas el error de estimación de la salida dependerá solo del vector de fallas afectando al sistema.

Un esquema de generación residual se puede apreciar en 2.3

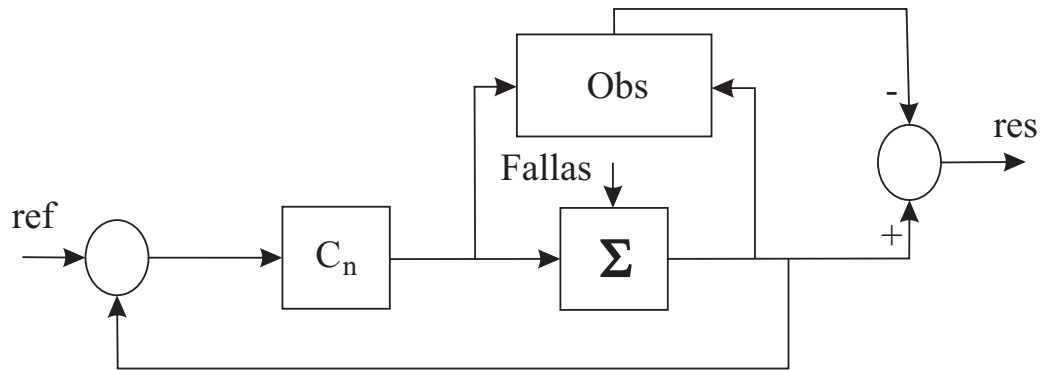


Figura 2.3: Esquema de generación residual.

El problema de generación de residuo puede ser resuelto como sigue:

Utilizar como residuo $r(t)$ el error de estimación de la salida. Las fallas satisfacen los siguientes supuestos de trabajo:

1. El modelo (tiempo de evolución) de la falla es desconocido.

2. El modelo matemático del sistema nominal es incierto (con tolerancia desconocida).
3. Existe un ruido del sistema y un ruido de medición (con características desconocidas).

Condiciones de Existencia de una Solución

1. Conocimiento de un comportamiento *Nominal* esto es valores nominales de A,B,C
2. Modelado de la falla como aditiva o multiplicativa.
3. Existencia de relaciones analíticas de redundancia. Dependiendo el observador que se pretenda utilizar.
4. Detectabilidad de la falla. Es decir, el efecto de la falla se manifiesta en la salida. [2]
5. Fiabilidad satisfactoria de información redundante, esto es invarianza o al menos robustez con respecto a entradas desconocidas.

2.1.4.1 OBSERVADOR CON CONVERGENCIA EN TIEMPO FINITO

El problema que es tratado es una detección de fallas utilizando observadores de la salida con convergencia en tiempo finito. Basandonos en el diseño de un observador con entradas desconocidas (UIO) introducido por [6] y el observador lineal con convergencia en tiempo finito [8] se presenta un enfoque como parte de una solución novedosa.

2.1.5 DESICIÓN SOBRE PRESENCIA DE FALLAS Y SU AISLAMIENTO

El enfoque de redundancia analítica requiere que el generador de residuos realice algún tipo de validación de la relación del sistema nominal usando la entrada actual u , y la medición y de salida.

Si la falla ocurre entonces la relación de redundancia analítica ya no se satisface y el residuo $r \neq 0$ ocurre.

El valor del residuo se usa para una desición apropiada. El residuo se evalúa mediante una lógica en orden de monitorear el tiempo de ocurrencia de falla y la localización de esta.

Notese que para la generación del residuo se requieren de:

1. El modelo nominal, es decir, libre de fallas.
2. El Observado (sistema actual, posiblemente con la presencia de fallas.)

Con la finalidad de lograr alto desempeño de detección de falla con un índice bajo de alarmas falsas, el modelo nominal utilizado debe de corresponder al modelo observado excepto por las fallas. Básicamente hay tres tipos de formas de generar señales acentuadas de falla usando redundancia analítica [9]: Espacio de paridad, mediante observadores y mediante identificación de parámetros.

Las señales resultantes, residuos, son usadas por las funciones de desición como normas o funciones de probabilidad. La base de una desición de una ocurrencia de una falla es la firma de la falla, esto es una señal que es obtenida por algún tipo de modelo de falla del sistema definido como los efectos asociados a la falla.

2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En el marco del diagnóstico de fallas confiable y robusto frente a perturbaciones se plantea el siguiente problema a ser resuelto:

Problema. *Considerar un sistema lineal con entradas desconocidas (fallas y perturbaciones) y un valor de tiempo arbitrario pequeño D . El problema consiste en obtener un procedimiento de diseño que garantice la existencia de un generador de residuos robusto a las perturbaciones y que converja en el tiempo preestablecido D .*

△△

El problema planteado es el tema central de la tesis y es el que brinda la oportunidad para llevar a cabo las contribuciones descritas.

CAPÍTULO 3

SOLUCIÓN PROPUESTA

El esquema de solución propuesto esta fundamentado en diferentes resultados parciales disponibles en la literaura. Aqui se utilizaron estos resultado de manera conveniente para proporcionarle características deseadas al generador residual, de acuerdo a la formulación del problema presentado en el capítulo 2.

3.1 OBSERVADORES CON CONVERGENCIA DE TIEMPO FINITO

La solución de el problema a la convergencia al error en tiempo finito es tomado de [8] . En la teoría de observadores de sistemas lineales la convergencia en tiempo finito es una propiedad atractiva y que en lo posterior es usada para garantizar la confiabilidad de nuestro generador de residuos apartir de la convergencia al error.

Considerar un sistema lineal invariante en el tiempo dado por

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad t \geq t_0 \quad (3.1)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (3.2)$$

con $x \in \mathfrak{R}^n$, $u \in \mathfrak{R}^m$ y la salida $y \in \mathfrak{R}^p$, las matrices A , B y C son matrices constantes y conocidas de dimensiones adecuadas.

Suponer que el par (A, C) es observable. El primer paso consiste en definir dos observadores identidad (cada uno con una dinámica diferente a la del otro, es decir, que no tengan la misma dinámica) para el sistema (3.1)-(3.2), es decir,

$$\dot{z}_1(t) = (A - H_1C)z_1(t) + H_1y(t) + Bu(t) \quad (3.3)$$

$$\dot{z}_2(t) = (A - H_2C)z_2(t) + H_2y(t) + Bu(t) \quad (3.4)$$

Ahora con la definición de las matrices:

$$\mathcal{F} \triangleq \begin{bmatrix} A - H_1C & 0 \\ 0 & A - H_2C \end{bmatrix}, \quad H \triangleq \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix},$$

$$G \triangleq \begin{bmatrix} B \\ B \end{bmatrix}, \quad T \triangleq \begin{bmatrix} I_n \\ I_n \end{bmatrix}, \quad z(t) \triangleq \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix},$$

Asignando H tal que \mathcal{F} es estable, y el retraso de tiempo D tal que $|T e^{\mathcal{F}D}T| \neq 0$, el estimado \hat{x} de x esta dado por

$$\hat{x}(t) = K [z(t) - e^{\mathcal{F}D}z(t - D)] \quad (3.5)$$

$$\dot{z}(t) = \mathcal{F}z(t) + Hy(t) + Gu(t), \quad t \geq t_0 \quad (3.6)$$

$$K \triangleq \begin{bmatrix} I_n & 0_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T & e^{\mathcal{F}D}T \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.7)$$

La estructura del observador que converge en tiempo finito puede ser encontrada en la figura 3.1. Como es destacado en [8], en teoría, la convergencia del observador

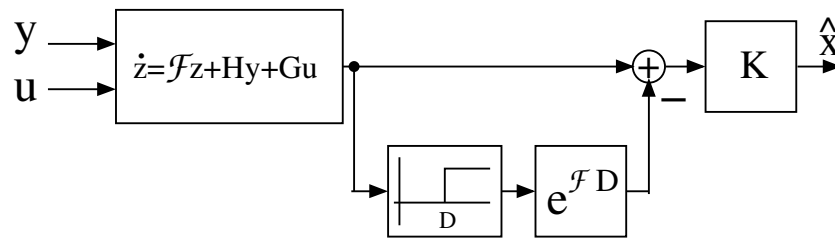


Figura 3.1: Estructura del observador con convergencia en tiempo finito

puede realizarse en un tiempo arbitrariamente pequeño D .

Una observación importante consiste en ver que la cualidad de convergencia en tiempo finito se obtiene a partir de que la ecuación del error sea una ecuación

diferencial ordinaria y homogénea de orden n . Lo cual puede tener implicaciones interesantes en el futuro.

3.2 OBSERVADORES CON ENTRADAS DESCONOCIDAS

El esquema de generador de residuos basado en observadores es presentado en la figura 3.2.

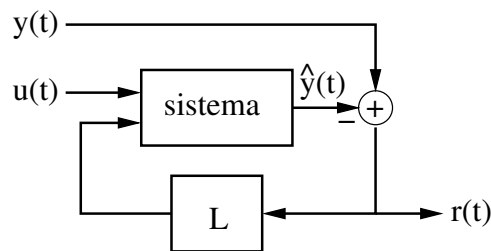


Figura 3.2: Esquema de generador residual basado en observadores

Note que si un sistema cuenta con entradas desconocidas al diseñar un observador, este tendrá un error, debido a que no es posible compensar las entradas que no se conocen. En este caso se cuenta con resultados en la literatura que permiten la construcción de observadores de estado aún y cuando no se conozca alguna entrada. En esta sección son revisados dos procedimientos: uno de orden reducido y uno de orden completo.

3.2.1 OBSERVADOR DE ORDEN REDUCIDO CON ENTRADAS DESCONOCIDAS

El observador con entradas desconocidas en el cual es utilizado en esta subsección fue tomado de [10]. Hay que hacer notar que este tipo de observador fue también considerado por [13].

Considerar el sistema (3.1)-(3.2) pero con fallas $f(t)$ y perturbaciones $d(t)$, representado como sigue:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) + Ff(t), \quad x_0 \quad (3.8)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (3.9)$$

donde $d \in \mathfrak{R}^l$ y $f \in \mathfrak{R}^q$. Suponiendo que $\text{rank}(C) = p$, $\text{rank}(E) = l$, $\text{rank}(F) = q$, $\text{rank}(CE) = l$ ($l \leq p$), $\text{rank}(CF) = q$ ($q \leq p$) y $q + l \leq p$. Note que en este trabajo no se consideran fallas en los sensores.

Definir una transformación T (de similaridad, es decir, $\det(T) \neq 0$) as $T \triangleq [N \ E \ F]$, con $N \in \mathfrak{R}^{n \times (n-l-q)}$ una matriz tal que T llegue a ser regular (es decir, $\det(T) \neq 0$). Aplicando la transformación como $\bar{x}(t) = T^{-1}x(t)$ el sistema transformado resulta:

$$\dot{\bar{x}}(t) = \bar{A}\bar{x}(t) + \bar{B}u(t) + \bar{E}d(t) + \bar{F}f(t), \quad (3.10)$$

$$y(t) = \bar{C}\bar{x}(t) \quad (3.11)$$

donde

$$\bar{x} = T^{-1}x = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \bar{x}_3 \end{bmatrix}; \quad \bar{A} = T^{-1}AT = \begin{bmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \bar{a}_{13} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & \bar{a}_{23} \\ \bar{a}_{31} & \bar{a}_{32} & \bar{a}_{33} \end{bmatrix}$$

$$\bar{B} = T^{-1}B = \begin{bmatrix} \bar{b}_1 \\ \bar{b}_2 \\ \bar{b}_3 \end{bmatrix}; \quad \bar{E} = T^{-1}E = \begin{bmatrix} 0 \\ I_l \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{F} = T^{-1}F = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_q \end{bmatrix}; \quad \bar{C} = CT = \begin{bmatrix} CN & CE & CF \end{bmatrix}$$

Note que las ecuación diferencial que corresponde a \bar{x}_1 es parte del estado que no esta conectado de forma directa al vector de las perturbaciones $d(t)$ o al vector de fallas $f(t)$. La parte del estado que esta directamente conectado a las perturbaciones

es la ecuación diferencial asociada con $\bar{x}_2(t)$ y de la misma forma, la parte del estado que esta conectada directamente con las fallas es la ecuación diferencial de $\bar{x}_3(t)$, de tal forma que si omitimos, por simplicidad, la dependencia del tiempo de las señales, estas ecuaciones pueden escribirse como:

$$\dot{\bar{x}}_1(t) = \begin{bmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \bar{a}_{13} \end{bmatrix} \bar{x}(t) + \bar{b}_1 u(t) \quad (3.12)$$

$$\dot{\bar{x}}_2(t) = \begin{bmatrix} \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & \bar{a}_{23} \end{bmatrix} \bar{x}(t) + \bar{b}_2 u(t) + d(t) \quad (3.13)$$

$$\dot{\bar{x}}_3(t) = \begin{bmatrix} \bar{a}_{31} & \bar{a}_{32} & \bar{a}_{33} \end{bmatrix} \bar{x}(t) + \bar{b}_3 u(t) + f(t) \quad (3.14)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} CN & CE & CF \end{bmatrix} \bar{x}(t) \quad (3.15)$$

De acuerdo con la teoría relacionada con los observadores de entradas desconocidas, para poder estimar todo el estado se requiere que \bar{x}_2 y \bar{x}_3 estén disponibles para ser obtenidas de la salida, lo cual está conectado directamente con las condiciones de existencia del UIO. Note que en general esta no es una condición necesaria para el diagnóstico de fallas [7]. El procedimiento para extraer la parte del estado requerida a partir de la ecuación de salida, bajo el supuesto que esto es posible, es el siguiente: considerar la transformación de la salida U , [13]:

$$U = \begin{bmatrix} CE & CF & Q \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

donde $Q \in \mathfrak{R}^{p \times (n-l-q)}$ es arbitraria excepto por que U llegue a ser regular. Ahora definiendo

$$U^{-1} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$$

Con $U_1 \in \mathfrak{R}^{l \times p}$, $U_2 \in \mathfrak{R}^{p \times p}$ y $U_3 \in \mathfrak{R}^{(n-l-q) \times p}$

$$U^{-1}U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} CE & CF & Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_l & 0 & 0 \\ 0 & I_q & 0 \\ 0 & 0 & I_{n-l-q} \end{bmatrix}$$

Premultiplicando en ambos lados el resultado de $U^{-1}U$ por la ecuación 3.15 resulta

$$U_1 y(t) = U_1 CN \bar{x}_1(t) + \bar{x}_2(t) \quad (3.17)$$

$$U_2 y(t) = U_2 C N \bar{x}_1(t) + \bar{x}_3(t) \quad (3.18)$$

$$U_3 y(t) = U_3 C N \bar{x}_1(t) \quad (3.19)$$

de las ecuaciones anteriores, un estimado del vector de falla esta dado por la ecuación (3.14) y sustituyendo los estados por sus estimados:

$$\hat{f}(t) = \hat{\bar{x}}_3(t) - \begin{bmatrix} \bar{A}_{31} & \bar{A}_{32} & \bar{A}_{33} \end{bmatrix} \hat{\bar{x}}(t) - \bar{B}_3 u(t) \quad (3.20)$$

Lo anterior hace claro que siguiendo este procedimiento la obtención del estimado del vector de fallas requiere la derivada temporal de estado $\bar{x}_3(t)$. Una parte del estado, \bar{x}_2 y \bar{x}_3 , pueden ser obtenidos de la ecuaciones (3.17) y (3.18), respectivamente. La parte del estado que corresponde a \bar{x}_1 puede ser estimada a partir del modelo dado por la ecuación (3.19) utilizando las mediciones correspondientes.

Los enfoques que están basados en observadores de orden reducido pueden encontrar problemas que son de otra forma (con observadores de orden completo) solubles. Esto queda de manifiesto cuando se utiliza el esquema de orden reducido presentado en esta sección con el sistema presentado en [13], el cual tiene un problema cuando el subsistema calculado robusto a las perturbaciones es inestable y la ley de control nominal no logra estabilizarlo. En este caso es bien sabido que no se puede hacer diagnóstico de fallas [12]. Esta situación fue pasada por alto en el trabajo [13] lo cual hace que los resultados presentados no sean válidos. Con la finalidad de obtener una solución válida en esta tesis, se considera un esquema de orden completo que no adolece de este problema.

3.2.2 OBSERVADOR DE ORDEN COMPLETO CON ENTRADAS DESCONOCIDAS

Los resultados del observador de orden completo con entradas desconocidas están tomados de [6]. Considerando al sistema (3.8)-(3.9). Un observador con entra-

das desconocidas robusto a las perturbaciones $d(t)$ esta dado por:

$$\dot{\zeta}(t) = M\zeta(t) + Ly(t) + Gu(t) \quad (3.21)$$

$$\hat{x}(t) = \zeta(t) - \Gamma y(t) \quad (3.22)$$

con:

$$\begin{aligned} \Gamma &\triangleq -E(CE)^+ + W(I_p - (CE)(CE)^+) \\ (CE)^+ &\triangleq ((CE)^T(CE))^{-1}(CE)^T \\ P &\triangleq I_n + \Gamma C \\ M &\triangleq PA - K_r C \\ L &\triangleq K_r - M\Gamma \\ G &\triangleq PB \end{aligned} \quad (3.23)$$

Note que mediante la definición (o la redefinición) de la matriz E es posible la manipulación de la sensibilidad del estimado a las fallas. Note que la matriz K_r debe de ser seleccionado de tal forma que la matriz del sistema del observador M sea estable y con polos mas a la izquierda de los del sistema (valores propios de la matriz A). La matriz de ponderación W puede ser seleccionada libremente, en particular puede ser cero.

Las condiciones de existencia para el observador de orden completo con entradas desconocidas fueron estudiadas en [6] y son presentadas aqui para conveniencia del lector.

Teorema 1. [6]. Para el sistema (3.8)-(3.9) con $f = 0$, existe un observador (3.21)-(3.22) si y solo si las siguientes condiciones se verifican:

1. $\text{rango}(CE) = \text{rango}(E)$
2. $\text{rango} \begin{pmatrix} sP - PA \\ C \end{pmatrix} = n, \forall z \in C, \text{Re}(s) \geq 0$

△△

Una interpretación de las condiciones es la siguiente: la primera significa que la transferencia de la perturbación a la salida debe de ser de grado relativo 1. La segunda condición quiere decir que el par (PA, C) debe de ser observable.

3.3 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO PROPUESTO

El procedimiento propuesto consiste en utilizar el observador robusto para obtener un residuo robusto. despues construir un esquema de convergencia en tiempo finito para el generador residual robusto disponible. Esto es realizado como sigue:

Teorema 2. [4] *El sistema*

$$\dot{\zeta}(t) = M\zeta(t) + Hy(t) + Gu(t) \quad (3.24)$$

$$r(t) = L_1y(t) + L_2\zeta(t) - L_2\Gamma y(t) \quad (3.25)$$

representa un generador de residuos de orden completo y robusto frente a perturbaciones $d(t)$, si se satisfacen las condiciones 3.23 y la siguiente condición se cumple adicionalmente: $L_1C + L_2 = 0$

Lema 1[3] Considerar el sistema (3.8)-(3.9). Suponer que las condiciones de los teoremas 1 y 2 se satisfacen. Adicionalmente suponer que existe la inversa de la matriz $\begin{bmatrix} Te^{MD}T \end{bmatrix}$. Entonces la convergencia en tiempo finito puede ser incorporada al generador residual (3.24)-(3.25).

Procedimiento 1

1. **Observadores con dinámica distinta.** Aquí se requiere del diseño de dos generadores de residuos robustos en los cuales la dinámica no es igual.

$$\dot{\zeta}_1(t) = M_1\zeta_1(t) + H_1y(t) + \bar{G}u(t) \quad (3.26)$$

$$\dot{\zeta}_2(t) = M_2\zeta_2(t) + H_2y(t) + \bar{G}u(t) \quad (3.27)$$

sujeto a las condiciones:

$$\Gamma = -E(CE)^\dagger + W(I_p - (CE)(CE)^\dagger)$$

$$(CE)^\dagger = \{(CE)^T(CE)\}^{-1} (CE)^T;$$

$$P = I_n + \Gamma C$$

$$M_1 = PA - K_{r_1}C$$

$$M_2 = PA - K_{r_2}C$$

$$H_1 = K_{r_1} - M_1\Gamma$$

$$H_2 = K_{r_2} - M_2\Gamma$$

$$\bar{G} = PB$$

2. Definir matrices

$$M \triangleq \begin{pmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{pmatrix};$$

$$\zeta(t) \triangleq \begin{pmatrix} \zeta_1(t) \\ \zeta_2(t) \end{pmatrix}$$

$$H \triangleq \begin{pmatrix} H_1 \\ H_2 \end{pmatrix}$$

$$G \triangleq \begin{pmatrix} \bar{G}_1 \\ \bar{G}_2 \end{pmatrix}$$

$$T \triangleq \begin{pmatrix} I_n \\ I_n \end{pmatrix}$$

3. Construcción de estado estimado.

$$\hat{\zeta}(t) = K [\zeta(t) - e^{MD}\zeta(t-D)]$$

con

$$K = \begin{bmatrix} I_n & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T & e^{MD}T \end{bmatrix}^{-1}$$

4. Construir el residuo

$$r(t) = L_1y(t) + L_2\hat{\zeta}(t) - L_2\Gamma y(t)$$

Mediante este procedimiento se garantiza, si las condiciones de existencia son satisfechas, la construcción de un generador de residuos robusto y además que este cuente con la convergencia deseada.

Note que el procedimiento y las condiciones de existencia son fáciles de programar. Además el diseño requiere ser realizado fuera de línea, es decir, no en tiempo real. De acuerdo con la experiencia en el diseño realizado con diferentes modelos, se puede considerar tiempos muy pequeños para la convergencia del residuo a cero.

A pesar que la idea de considerar generación residual con convergencia en tiempo finito ya ha sido propuesta previamente [14], sin embargo, no se ha manejado con todo el potencial y ventajas que se discuten en este trabajo. Resultados previos, tales como [14] hacen uso de observadores de orden reducido y no de orden completo. Si bien es cierto, que la observación de orden completo para formular problemas de generación de residuos da condiciones suficientes y no necesarias y suficientes.

Adicionalmente, queda claro que es requerido considerar la convergencia de tiempo finito en la generación de residuos como una práctica estandar en el diagnóstico de fallas.

CAPÍTULO 4

EJEMPLO DE APLICACIÓN

A modo de mostrar una aplicación al desarrollo anterior se considera un modelo linealizado del sistema de control de posición de un satélite, el cual ha sido tomado de [13]. El interés de considerar este modelo es para mostrar como realizar una solución alternativa al problema planteado en el trabajo respecto al diagnóstico. Cabe aclarar que la propuesta de solución presente en [13] contiene un error que invalida esta, En cambio, la solución presentada en el capítulo anterior permite un diagnóstico adecuado. Aunado a esto se le agrega la posibilidad de converger en tiempo finito.

4.1 MODELO DEL SISTEMA

Considere el siguiente sistema lineal e invariante en el tiempo:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) + Ff_a(t) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\tag{4.1}$$

donde $x = [\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi} \ \phi \ \theta \ \psi]^T$, con ϕ , θ y ψ corresponden a los ángulos de guiñada, cabeceo y balanceo respectivamente y $\dot{\phi}$, $\dot{\theta}$ y $\dot{\psi}$ las velocidades angulares correspondientes; la entrada de control consta de tres elementos asociados con fuerzas en cada dirección $u = \begin{bmatrix} L_x & L_y & L_z \end{bmatrix}^T$; las matrices del sistema definidas a continuación:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.00025 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.000143 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0125 & 0 & 0 \\ 0 & 0.011 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0143 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = I_6 \quad (4.3)$$

Donde la perturbación aditiva desconocida $Ed(t)$ consiste en incertidumbre del modelo definida como:

$$d(t) = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0.0002 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(t) \quad (4.4)$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4.5)$$

Se asume que la señal de falla es un escalon con la siguiente distribucion tal que:

$$F = \begin{bmatrix} 0.0125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4.6)$$

El sistema por si solo es inestable en lazo abierto, para estabilizarlo se usa un control por retroalimentacion de estado que permite un objetivo de regulaci3n. La ley de control esta dado por $u(t) = -K_n x(t) + K_r r$, con las matrices K_n y K_r dadas por:

$$K_n = \begin{bmatrix} 260 & 0 & 0.02 & 200 & 0 & 0 \\ 0 & 295.455 & 0 & 0 & 204.545 & 0 \\ -0.006 & 0 & 227.27 & 0.0045 & 0 & 183.57 \end{bmatrix}$$

y

$$K_r = \begin{bmatrix} 200 & 0 & 0 \\ 0 & 204.54545 & 0 \\ 0.00488 & 0 & 183.566430 \end{bmatrix}$$

Dando como resultado el siguiente conjunto de polos en lazo cerrado:

$$\{-2, -1.25, -1.7495, -1.5004, -2.249, -0.99\} \quad (4.7)$$

teniendo como valores de referencia $r = \begin{bmatrix} -0.5 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}^T$.

El comportamiento nominal del sistema con $d(t) = 0$, $f(t) = 0$ puede verse en la figura 4.1. Como se aprecia en la figura 4.1, el sistema con el control nominal lleva

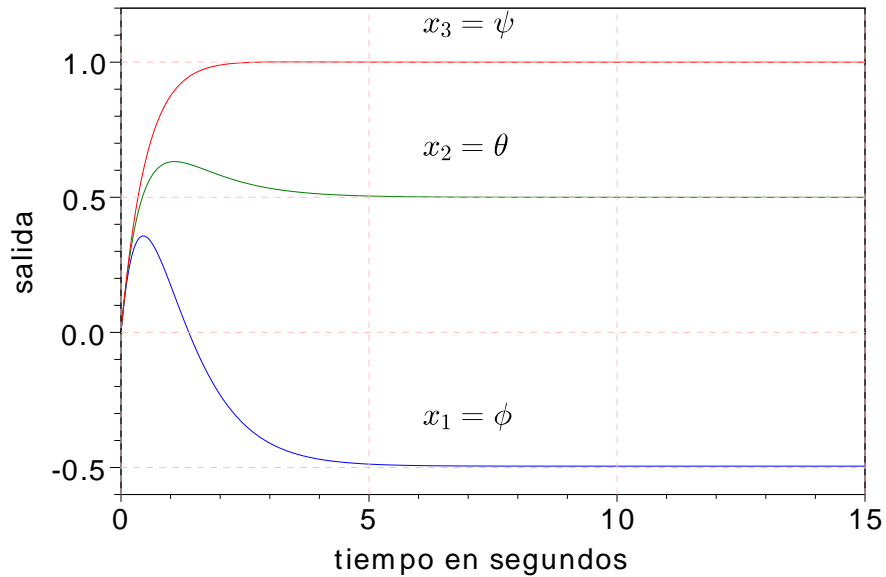


Figura 4.1: Respuesta del sistema nominal

las posiciones angulares deseadas a partir de las condiciones iniciales en cero.

4.2 DISEÑO DE LA DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLA

En este punto se requiere el diseño de dos ecuaciones dinámicas que permitan la robustez frente a la misma perturbación, pero cada uno con unos polos distintos (pero estables). Para esto considerar el diseño de las matrices Γ y P coinciden. La diferencia en los polos de ambos observadores se obtiene al ubicar los polos mediante las ganancias K_{r1} y K_{r2} . Con lo cual también se determinan H_1 , H_2 y G .

4.2.1 PASO 1: DISEÑO DE LAS MATRICES DE LOS GENERADORES DE RESIDUOS ROBUSTOS

Las matrices asociadas con el diseño son las siguientes:

$$C * E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

con esto y utilizando una matriz de ponderación $W = 0$, la matriz Γ resulta:

$$\Gamma = - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

En este caso la matriz P resulta en:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

El siguiente paso consiste en ubicar los valores propios de dos conjuntos previamente establecidos. Para fines de este trabajo se utilizan los siguientes dos conjuntos:

$$\begin{aligned} \text{Conjunto de Polos 1} &= \{ -3, -3.1, -3.2, -3.3, -3.4, -3.5 \} \\ \text{Conjunto de Polos 2} &= \{ -3.6, -3.7, -3.8, -3.9, -4, -4.1 \} \end{aligned}$$

Asociados con cada conjunto se calcula una ganancia, K_{r1} y K_{r2} respectivamente:

$$\begin{aligned} K_{r1} &= \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0.00205 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.5 \end{pmatrix} \\ K_{r2} &= \begin{pmatrix} 3.6 & 0 & 0.00205 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Con lo que las matrices del sistema para las dinámicas de los observadores quedan:

$$M_1 = \begin{pmatrix} -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3.2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -3.3 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -3.4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -3.5 \end{pmatrix}$$

$$M_2 = \begin{pmatrix} -3.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3.7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3.8 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -3.9 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -4.1 \end{pmatrix}$$

y las matrices H_1 y H_2 :

$$H_1 = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0.00205 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 3.5 \end{pmatrix}$$

$$H_2 = \begin{pmatrix} 3.6 & 0 & 0.00205 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 4.1 \end{pmatrix}$$

y la \bar{G} :

$$\bar{G} = \begin{bmatrix} 0.0125 & 0 & 0 \\ 0 & 0.011 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.2.2 PASO 2: OBSERVADOR CON CONVERGENCIA EN TIEMPO FINITO

Ahora se construyen las matrices a ser utilizadas para la reconstrucción en tiempo finito de los estados y la salida, para con esto formar el generador de residuos requerido. Las matrices son:

$$M = \begin{pmatrix} -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -3.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -3.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -3.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -3.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -4.1 \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0.00205 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 3.5 \\ 3.6 & 0 & 0.00205 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 4.1 \end{pmatrix}$$

$$G = \begin{pmatrix} 0.0125 & 0 & 0 \\ 0 & 0.011 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.0125 & 0 & 0 \\ 0 & 0.011 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

y

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Así usando la estructura de (3.6), donde nuestra entrada es $u(t) = -Kx(t) + K_r r$ procedemos a escribir nuestro observador de la forma:

$$\dot{z}(t) = \mathcal{F}z(t) + Hy(t) + Gu(t), \quad t \geq t_0 \quad (4.8)$$

El estimado \hat{x} (3.5) de x con convergencia en tiempo finito D está dado por:

$$\hat{x}(t) = \mathcal{K} [z(t) - e^{\mathcal{F}D} z(t - D)] \quad (4.9)$$

4.2.3 PASO 3: CONSTRUCCIÓN DEL ESTADO ESTIMADO

Para esto se requiere el cálculo de la matriz K y esto a su vez requiere de utilizar el valor de $D=0.1$:

$$K = \begin{pmatrix} -16.1766 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -16.1716 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -16.17166 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -16.17166 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -16.17166 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -16.17166 & 0 \\ 17.17166 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 17.17166 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 17.17166 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17.17166 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 17.17166 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 17.17166 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 17.17166 \end{pmatrix} \dots$$

4.2.4 PASO 4: CONSTRUCCIÓN DEL RESIDUO

Para el residuo se requieren dos matrices adicionalmente:

$$L_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$L_2 = - \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Note que existen diversas posibilidades de selección de estos valores. En particular, como la matriz de salida es la identidad, resulta que $L_1 = -L_2$. Con los fines que se persiguen aquí, es decir, las de mostrar la convergencia en tiempo finito y la robustez simultáneamente, se considera el residuo escalar y formado por la suma con ponderación unitaria de todos los estados. Cabe aclarar que esto se hace sin pérdida de generalidad.

4.3 RESULTADO DE SIMULACION

El sistema (4.1) es simulado utilizando el software *Scilab* con la finalidad de mostrar el desempeño del diseño propuesto en el capítulo anterior. Con la finalidad de mostrar las características y cualidades del resultado obtenido se consideran los siguientes casos de estudio:

Caso	Variable	Descripción	Tipo de convergencia
1	$y(t)$	Situación nominal	no aplica
2	$r(t)$	Falla $f = 0$,	Asintótico
3	$r(t)$	Falla $f = 0$,	Finita
4	$r(t)$	Falla $f = 1000$, $t = 1$	Asintótico y finito
5	$r(t)$	Falla $f = 1000$, $t = 7$	Asintótico y finito

Tabla 4.1: Casos de estudio considerados

4.3.1 RESULTADOS DE SIMULACIÓN, CASO 1

Aquí se presenta la respuesta del sistema cuando se inicia con condiciones iniciales diferentes de cero, en particular con

$$x_0 = \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ -5 \\ 5 \\ 10 \end{bmatrix}$$

Para el resultado de la simulación se consideran tres estados: $\phi(t)$, $\theta(t)$ y $\psi(t)$. Los resultados de la simulación se aprecian en la figura 4.2. El comportamiento es el esperado, es decir, el control lleva las posiciones angulares al valor de referencia aún

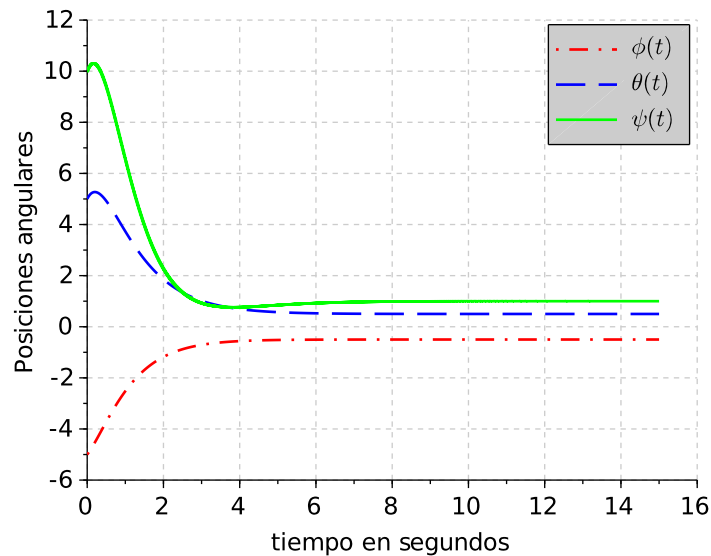


Figura 4.2: Posiciones angulares del sistema sin fallas

cuando las condiciones iniciales sean diferentes de cero. Situaciones mas interesantes se podrán apreciar en los siguientes casos.

4.3.2 RESULTADOS DE SIMULACIÓN, CASO 2

La respuesta de nuestro generador residual al sistema con perturbaciones pero sin fallas se aprecia en la figura 4.3.

El resultado mostrado en la figura 4.3 corresponde a la manera estandar de generador residual robusto disponible en la litaratura. Este caso se utiliza como medio de comparación.

4.3.3 RESULTADOS DE SIMULACIÓN, CASO 3

El residuo con perturbacion, pero en ausencia de falla para la situación de residuos con convergencia finita es mostrado en la figura 4.4.

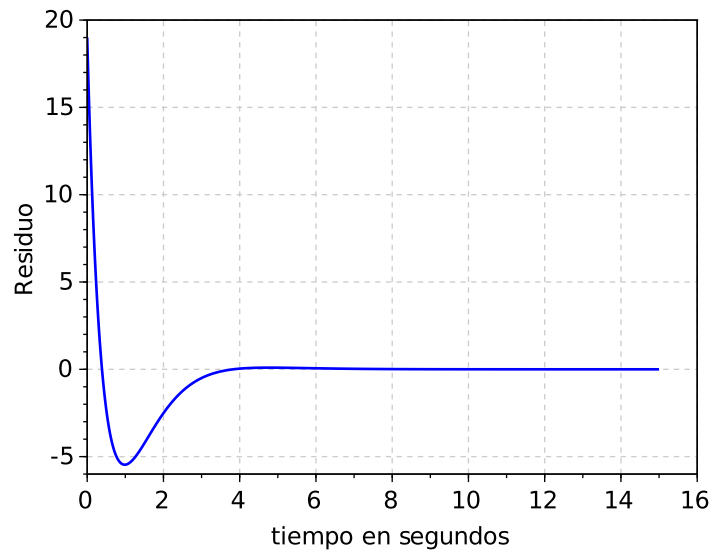


Figura 4.3: Residuo robusto a perturbaciones con convergencia asintótica

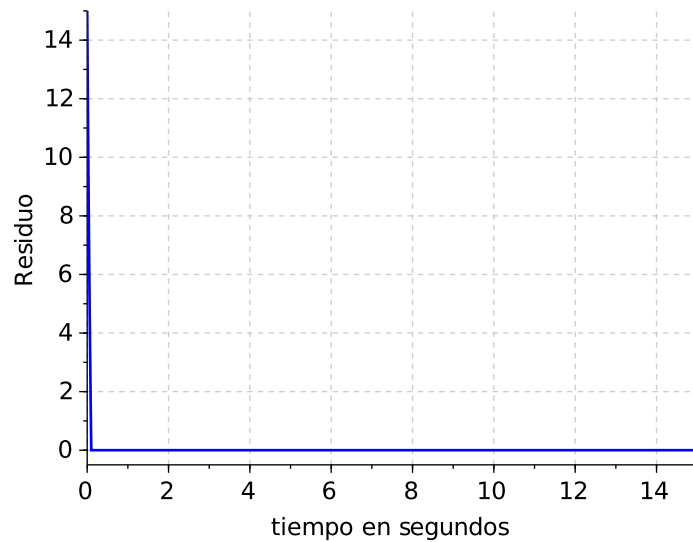


Figura 4.4: Residuo robusto a perturbaciones con convergencia finita

Como se puede apreciar de la evolución del residuo, este converge en el tiempo prescrito, es decir, en $t = 0.1$ segundos. Esto es bastante rápido. Esto será utilizado con la finalidad de hacer que el residuo sea utilizable, es decir, confiable, a partir del tiempo prescrito.

Una amplificación de la escala de tiempo permite apreciar mejor la convergencia en $t = 0.1$ segundos, la cual es mostrada en figura 4.5.

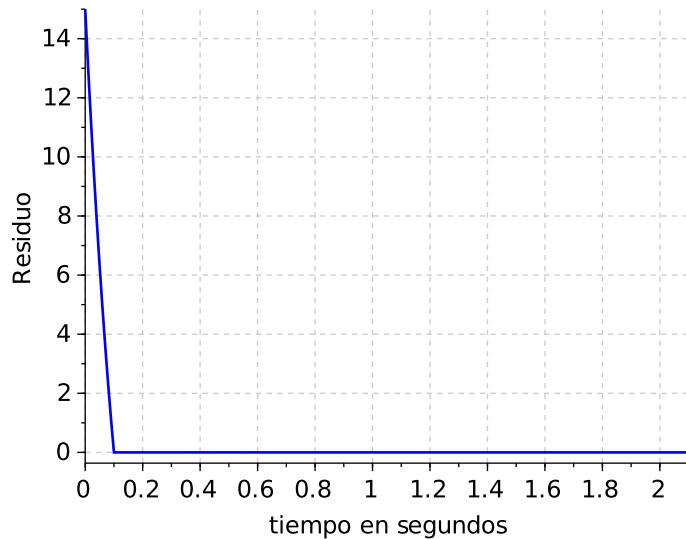


Figura 4.5: Amplificación de la escala de tiempo del residuo robusto a perturbaciones con convergencia finita

4.3.4 RESULTADO DE SIMULACIÓN, CASO 4

En este caso se revisa el comportamiento de los generadores de residuos ante la presencia de una falla en el instante $t = 1$ segundo. La magnitud de la falla simulada es de $f = 1000$ y la perturbación esta presente. Sin embargo, como se apreció previamente, el residuo es robusto a las perturbaciones. Los resultados para el residuo asintótico se presentan en la figura 4.6

Y para el residuo con convergencia en tiempo finito se pueden revisar en la figura 4.7. Como se puede apreciar, el residuo con convergencia en tiempo finito detecta la presencia de la falla de una forma directa. La magnitud pequeña es debido a la transferencia de la falla al residuo y no fue considerado en el diseño. El residuo asintótico, aún y cuando se ve afectado por la falla, resulta muy difícil detectarla

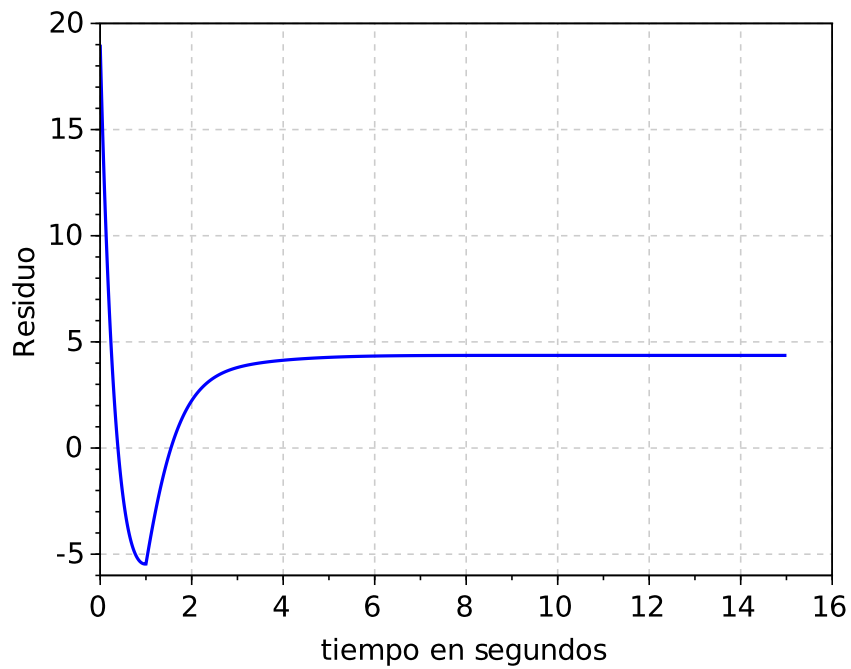


Figura 4.6: Residuo asintótico con falla en $t = 1$ segundo.

y de hecho, lo que ocurra antes de la convergencia del residuo a cero no puede ser confiablemente evaluado como falla.

4.3.5 RESULTADOS DE SIMULACIÓN, CASO 5

El caso 5 es semejante al 4, excepto porque el tiempo de ocurrencia de la falla es en el segundo 7 y no en el 1. Esto significa que ambos residuos se encuentran en la zona de confiabilidad. Los resultados se pueden ver en las figuras 4.8 y 4.9.

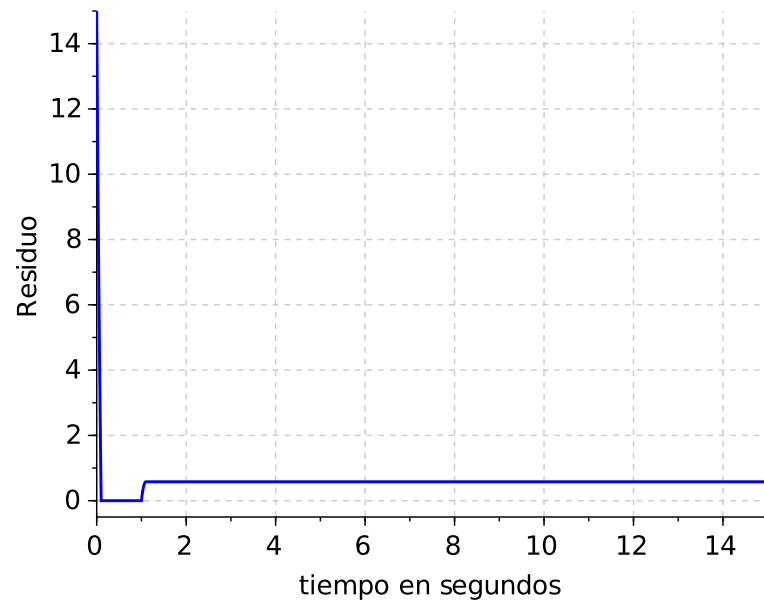


Figura 4.7: Residuo convergente en tiempo finito con falla en $t = 1$ segundo.

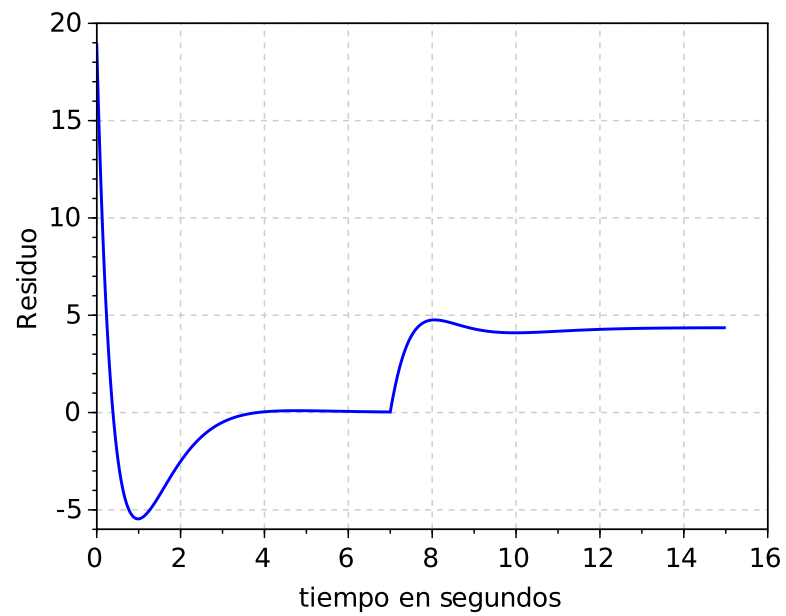


Figura 4.8: Residuo asintótico con falla en $t = 7$ segundos.

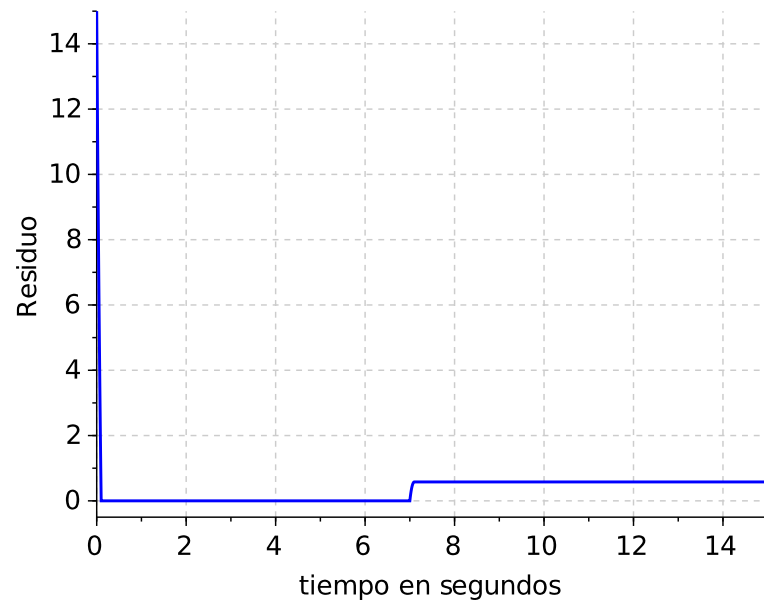


Figura 4.9: Residuo con convergencia finita con falla en $t = 7$ segundos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

La confiabilidad en el diagnóstico de fallas basado en modelos juega un papel importante en las certificaciones de procesos industriales debido a las altas exigencias de seguridad y desempeño actuales.

En el enfoque analítico basado en observadores, la generación de residuos refleja el efecto de las fallas dada la estimación de la salida del proceso. Estos esquemas utilizan la estimación del error de la salida como residuo.

La detección y aislamiento de fallas basada en modelos en especial en el enfoque de observadores siempre ha tenido una atención particular en el área de control automático, dado que las fallas abruptas o paros innecesarios en producción son muy costosos y esto justamente motiva el desarrollo de mejores técnicas para minimizar el efecto de los paros no programados.

Estas técnicas tienen características ligadas al modelo matemático de el proceso, pero dado que el modelo de el sistema no siempre está disponible, es no lineal o bien sus parámetros varían con el tiempo, el diseño tiende a complicarse, además de que dadas las características del ruido o perturbaciones tienden a ser desconocidas.

El diseño del generador de residuos con convergencia en tiempo finito está fundamentado en la linealidad (y homogeneidad) de la ecuación de la dinámica del error

de estimación, o bien, del generador de residuos nominal. Partiendo de ese punto, y utilizando propiedades de sistemas lineales asociados con operadores de adelanto se plantea una ecuación que debe de ser satisfecha por la dinámica del generador residual. Mediante una propuesta ingeniosa, usando dos ecuaciones, cada cual con polos distintos entre ellos, para la dinámica del generador residual. Se construye un estado extendido e ingeniosamente se despeja el valor actual. Esto involucra utilizar una señal con el valor de atraso D , que después representará el tiempo de convergencia del generador de residuos.

Note que cada generador de residuos asintótico puede ser construido robusto respecto a perturbaciones y/o a fallas. La convergencia en tiempo finito se logra sin alterar el comportamiento asintótico del diseño inicial. Se puede afirmar que el algoritmo para el diseño de generadores de residuo con convergencia en tiempo arbitrario es novedoso y este no comprometer la dinámica del generador de residuos del diseño original.

La característica distintiva del esquema es la combinación armoniosa de diferentes técnicas que están disponibles en la literatura, tales como el generador residual robusto de orden completo y/o orden reducido junto con el resultado de convergencia en tiempo finito.

Debe de hacerse notar que las fallas presentes deben de ser francas. Además, el tipo de falla usadas en el desarrollo corresponde al tipo aditivo presentes en actuadores. El máximo número de perturbaciones que pueden ser desacopladas no debe sobrepasar el número de actuadores independientes el sistema.

El enfoque usado tiene implicaciones prácticas en el diagnóstico de fallas para resolver problemas en donde el actuador es afectado por perturbaciones

Es notable que el uso del esquema propuesto puede ser usado en aplicaciones en tiempo real proporcionando confiabilidad en el diagnóstico después de un instante de tiempo preestablecido.

La convergencia en tiempo finito es una característica atractiva al enfoque de observadores para el diagnóstico de fallas ya que nos da la ventaja de poder asegurar el tiempo en el cual nuestro generador de residuos es eficiente, lo anterior fue aplicado en el ejemplo propuesto y es mostrado que con el solo hecho de cuidar las condiciones de existencia para el par de observador con convergencia en tiempo finito. Como se puede apreciar de los resultados, en el caso crítico en el que la falla ocurre antes del tiempo de convergencia del generador residual asintótico, el diagnóstico solo se puede realizar a partir del generador residual que converge en tiempo finito. Esta claro que si la falla ocurre antes de la convergencia del generador residual con convergencia en tiempo finito, la falla tampoco podrá ser detectada de manera confiable.

El tiempo de convergencia puede ser arbitrariamente pequeño o necesariamente pequeño dependiendo de la aplicación que se le use, es visto que en la fase transitoria el error de el estado observado es una combinación lineal de las exponenciales pertenecientes a los dos observadores individuales que se vuelven cero al $t = D$ dadas las condiciones de existencia del mismo.

El enfoque propuesto considera una estructura de orden completo que permite la solución de problemas que no se pueden resolver con esquemas de orden reducido.

La hipótesis planteada se verifica plenamente donde además se logra el resultado utilizando solo métodos lineales evitando así el uso de técnicas como la de modos deslizantes. Esto puede establecer una base para el diagnóstico e identificación de fallas en tiempo finito.

Para probar y validar el anterior procedimiento se uso un sistema de control lineal e invariante en el tiempo de posición de un satélite.

El propuesto esquema fue verificado a través de simulaciones computacionales, los resultados mostrados en el son muy efectivos y robustos ante perturbaciones para la estimación de la falla.

El ejemplo discutido puede ayudar o motivar futuros trabajos basados en el

enfoque de observadores para el diagnóstico e identificación de fallas al resolver de forma práctica un problema.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALCORTA-GARCIA, E. y P. M. FRANK, «Analysis of a class of dedicated observer schemes to sensor fault isolation», en *UKACC International conference on Control'96*, págs. 59–64, Exeter, UK 1996.
- [2] ALCORTA GARCIA, E., *Modelgestützte Residuengenerierung für die Diagnose von additiven and multiplicativen Fehler in dynamischen Systemen (in german)*, Tesis Doctoral, Gerhard-Mercator University of Duisburg (Duisburg-Essen Universität), Germany, July 1999.
- [3] ALCORTA GARCIA, E., F. E. LOPEZ CASTILLO y D. A. DIAZ ROMERO, «Generación residual con convergencia en tiempo finito usando observadores», en *XI Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, CIIN-DET 2015*, Cuernavaca Morelos, México., 25 al 27 de Marzo 2015.
- [4] CHEN, J. y R. J. PATTON, *Robust model based fault diagnosis for dynamic systems*, Kluwer Academic Publishers Group, 1999.
- [5] CLARK, R. N., D. C. FOSTH y V. M. WALTON, «Detecting instrument malfunctions in control systems», *IEEE Trans. on Aeroesp. and Elec. Sys.*, **AES-11**(4), págs. 465–473, July 1975.
- [6] DAROUACH, M., M. ZASADZINSKI y J. XU, «Full order observers for linear systems with unknown inputs», *IEEE Transactions on Automatic Control*, **39**(3), págs. 606–609, March 1994.

-
- [7] DING, S. X., *Model-based fault diagnosis techniques 2nd edition.*, segunda edición, Springer, 2013.
- [8] ENGEL, R. y G. KREISSELMEIER, «A Continuous-time observer which converges in finite time», *IEEE Transactions on Automatic Control*, **47**(7), págs. 1202–1204, July 2002.
- [9] FRANK, P. M., «Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - A survey», *Automatica*, **26**, págs. 459–474, 1990.
- [10] GUAN, Y. y M. SAIF, «A novel approach to the design of unknown input observers», *IEEE Trans. on Autom. Control*, **36**(5), págs. 632–635, may 1991.
- [11] ISERMANN, R., *Fault-diagnosis systems: An introduction from fault detection to fault tolerance*, primera edición, Springer, November 2006.
- [12] KINNAERT, M., R. HANUS y P. ARTE, «Fault detection and isolation for unstable linear systems», *IEEE Trans. on Automatic Control*, **40**, págs. 740–742, 1995.
- [13] LUAN, J. H. y T. D. ZHAO, «Novel design of actuator fault reconstruction», *International Journal of Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, **80**, págs. 44–50, 2008.
- [14] RAFF, T., F. LACHNER y F. ALLGÖWER, «A finite time unknown observer for linear systems», en *Proceedings of the 11 Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2006.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Francisco Eduardo López Castillo

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

DIAGNÓSTICO DE FALLAS BASADO EN OBSERVADORES CON
CONVERGENCIA EN TIEMPO FINITO

Fecha de nacimiento: 4 de Octubre de 1989, Lugar: Guadalupe, Nuevo León.
Padres: Dolores López García y Blanca Esthela Castillo Acevedo. Ingeniero en
Electrónica y Automatización por la Universidad Autónoma de Nuevo León en Agosto
del 2012. Practicas profesionales en NEMAK, Enero - Agosto 2011.