

*UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA*



*DISEÑO NORMALIZADO DE GENERADORES DE
RESIDUOS LINEALES*

POR

JUAN CARLOS RUIZ GARCÍA

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

OCTUBRE 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



TESIS

*DISEÑO NORMALIZADO DE GENERADORES DE
RESIDUOS LINEALES*

POR

JUAN CARLOS RUIZ GARCÍA

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

OCTUBRE 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 «Diseño normalizado de generadores de residuos lineales», realizada por el alumno Juan Carlos Ruiz García, con número de matrícula 1425251, 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. Cornelio Posadas Castillo

Revisor



Dr. Gerardo Romero Galván

Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirección de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, a 16 de octubre 2015

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	VIII
Resumen	IX
1. Introducción	1
1.1. Hipótesis	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Generales	3
1.2.2. Particulares	3
1.3. Metodología	3
2. Preliminares	5
2.1. Estado del arte	5
2.2. Generación residual	7
2.2.1. Observador Diagnóstico (DO)	8
2.2.2. Observador de entradas desconocidas como base para la estimación de la falla	9

3. Estimación de la falla	10
3.1. Descripción del capítulo	10
3.2. Generación del residuo	10
3.3. Estimación de la falla: idea general	11
3.4. Estimación de falla: Caso de fase mínima	12
3.4.1. Problema (Estimación de falla)	13
3.4.2. Supuestos de trabajo	13
3.5. Estimación de falla: Caso de fase no mínima	16
3.5.1. Algoritmo 1	17
3.5.2. Algoritmo (Buchholz, Grünhagen, 2008)	18
4. Ejemplos del uso del algoritmo en diversos casos	19
4.1. Modelo linealizado del sistema de control de posición de un satélite .	19
4.2. Calentador de Tanque Continuamente Agitado (Continuous Stirred Tank Heater)	26
4.3. Ejemplo Académico	32
4.3.1. Comparación de los algoritmos para sistemas de fase no mínima	33
5. Conclusiones y Trabajo a futuro	36

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Concepto de inversión	6
2.2. Diagrama esquemático de inversión para la transferencia G	6
2.3. Descripción esquemática de la generación residual basada en modelos.	8
3.1. Esquema para lograr la estimación de la falla.	12
3.2. Esquema de solución propuesto para los casos de fase no mínima	17
3.3. Algoritmo para sistemas de fase no mínima	18
4.1. Evolución nominal de las posiciones sin perturbaciones ni fallas.	21
4.2. Evolución del residuo ante la falla en la posición ϕ de magnitud 1.	24
4.3. Estimado de la falla usando $K = 1000$	24
4.4. Estimado de la falla usando una $K = 10,000$	25
4.5. Error de estimación una $K = 1,000$	25
4.6. Error de estimación utilizando una $K = 10,000$	26
4.7. Residuo obtenido al tener una falla en el segundo 7.	28
4.8. Estimación de la falla con $K = 1,000$	29

4.9. Estimación de la falla con $K = 10,000$	29
4.10. Error de la estimación de la falla con $K = 1,000$	30
4.11. Error de la estimación de la falla con $K = 10,000$	30
4.12. Error de la estimación de la falla con $K_1 = 1,000$ y $K_2 = \frac{7.0028}{0.0070012}$. . .	31
4.13. Error de la estimación de la falla con $K_1 = 1,000$ y $K_2 = \frac{7.0028}{0.0070012}$. . .	31
4.14. Entrada a estimar mediante algoritmos para sistemas de fase no mínima.	33
4.15. Error de estimación de la entrada usando como $K_1 = 1,000$ y $K_2 = \frac{5.005}{0.007}$ para el algoritmo 1 y $K = 1,000$ para Buchholz, Grunhagen. . .	34
4.16. Error de estimación de la entrada usando como $K_1 = 10$ y $K_2 = \frac{5.5}{0.7}$ para el algoritmo 1 y $K = 1,000$ para Buchholz, Grunhagen.	34

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, que inició siendo un sueño y terminó como una realidad.

Al Dr. Efraín Alcorta García, por toda su sabiduría, su paciencia y entrega al desarrollo de sus estudiantes, quien fue quien me guió a lo largo de este proyecto.

A mi familia ya que sin su apoyo incondicional, no hubiera logrado esta meta.

A Melany Ibarra, quien siempre estuvo conmigo animandome y motivandome.

A mis compañeros del programa, por su compañía en momentos de alegría, amargura y desesperanza.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo en la realización de este trabajo.

RESUMEN

Juan Carlos Ruiz García.

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: DISEÑO NORMALIZADO DE GENERADORES DE RESIDUOS LINEALES.

Número de páginas: 41.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: El objetivo general es desarrollar un procedimiento de diseño para la generación de residuos basada en observadores de tal forma que el efecto de diferentes fallas sobre el residuo esté dentro de una escala de magnitud comparable.

Metodología consiste en realizar primero una revisión de la bibliografía referente a la generación de residuo (teoría unificada de diseño) así como también se dominará las técnicas de diseño y se localizarán los grados de libertad en los diferentes métodos de generación. Se prosigue con la búsqueda de una forma de utilizar los grados de libertad encontrados para hacer la transferencia de la falla al residuo lo más cercana a la unidad como sea posible. Una de las ideas a ser exploradas es la inversión de sistemas dinámicos. Después de analizar y probar las ideas median-

te simulaciones se selecciona la que de mejores resultados. Se formaliza la idea con sustento matemático. Y por ultimo se implementará la técnica en algunos modelos para verificar su funcionamiento.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: Algoritmo de estimación de fallas usando la generación residual, mediante un algoritmo de inversión.

Firma del asesor: _____
Dr. Efraín Alcorta García

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El diagnóstico de fallas basado en modelos es un área que se ha consolidado en los últimos años debido a que estas técnicas sirven de herramienta para hacer frente a las exigencias actuales de seguridad y confiabilidad de la industria. Dentro de los métodos basados en modelos, una de las técnicas ampliamente reportadas en la literatura hace uso de observadores de la salida. Los observadores introducidos en 1964 por D. Luenberger [1], como forma de acceder a las variables internas que determinan el comportamiento de un sistema. La aplicación de observadores para el diagnóstico de fallas comienza con la propuesta realizada por el grupo del M.I.T. en [2] y a partir de ahí se desarrolla intensamente por mas de 30 años. El desarrollo alcanzado incluye diferentes tipos de observadores (orden completo, orden reducido, con entradas desconocidas, robustos, etc.) así como versiones en tiempo continuo, tiempo discreto, dominio de la frecuencia, etc.

La madurez del trabajo con observadores se puede apreciar en los libros que actualmente están disponibles en la literatura especializada sobre el tema, como por ejemplo [3], [4], [5]. A pesar de los avances en el análisis y diseño de esquemas de diagnóstico de fallas basados en observadores existen algunas cuestiones pendientes. Uno de los efectos no muy estudiados es la magnitud con la que una falla se refleja en el residuo. Diferentes fallas tienen diferentes magnitudes y ocasionalmente la magnitud es tan pequeña que hace aún y cuando de manera teórica puede ser detectada,

en la práctica puede que no sea posible.

La forma de hacer el diagnóstico de fallas sigue un procedimiento generalmente aceptado [6]: Primero una señal dependiente solo de las fallas es construida. Esta señal es llamada residuo, e idealmente el residuo será cero si el sistema esta libre de fallas y diferente de cero si una falla esta presente afectando al sistema. La extracción de la información sobre fallas ocurre en la evaluación de los residuos. Un valor de umbral es definido para comparar una función del residuo y así poder evitar falsas alarmas. Así, los residuos (producto de la generación residual) muestran algún cambio. En la práctica un residuo no es exactamente cero, aun y cuando no esté presente alguna falla en el sistema. Esto se debe a los errores de modelado, a las condiciones iniciales desconocidas o bien a pequeñas perturbaciones presentes. Para determinar si una falla está presente se hace necesario evaluar el residuo, es decir, extraer del residuo la información de la falla. Para esto se puede pasar el residuo a través de una norma y compararla con un umbral. La ganancia de la transferencia de la falla al residuo juega un papel muy importante para determinar si una falla está o no presente. Note que si una falla es de magnitud considerable, el efecto sobre el residuo que produce pudiera ser muy pequeño debido a esta ganancia antes mencionada. El problema consiste en hacer que a partir de los residuos se logre obtener un estimado de la falla (o tan cercano como sea posible) con respecto a la magnitud de la falla.

1.1 HIPÓTESIS

A través de la generación residual, se puede lograr estimar la magnitud de la falla, a pesar de la magnitud del residuo, la cual puede ser muy pequeño.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 GENERALES

Desarrollar un procedimiento de diseño para la generación de residuos basada en observadores de tal forma que el efecto de diferentes fallas sobre el residuo esté dentro de una escala de magnitud comparable.

Note que el objetivo general no implica el poder estimar la magnitud de la falla. En principio, el objetivo general planteado es menos exigente que la solución propuesta en este trabajo, como se vera mas adelante.

1.2.2 PARTICULARES

El desglose del objetivo general es el siguiente:

- Revisión de metodología para la generación residual unificada.
- Propuesta de modificación para obtener un generador residual normalizado.
- Desarrollo de algoritmo de diseño.
- Verificación del algoritmo.

1.3 METODOLOGÍA

La estrategia propuesta para alcanzar el objetivo general (y los objetivos particulares) es la siguiente:

-
- Se comienza con una revisión de la bibliografía referente a la generación de residuo (teoría unificada de diseño) así como también se revisarán las técnicas de diseño. La finalidad es poder ubicar los grados de libertad disponibles en los diferentes métodos de generación residual para poder encausar estos a la búsqueda de dar solución al problema que representa el cumplir el objetivo general.
 - Se prosigue con la búsqueda de una forma de utilizar los grados de libertad encontrados para hacer la transferencia de la falla al residuo lo más cercana a la unidad como sea posible. Alternativamente, una de las ideas a ser exploradas es la inversión de la transferencia de la falla al residuo, utilizando una técnica de inversión de sistemas dinámicos. Es importante destacar que el uso de técnicas de inversión de sistemas dinámicos debe de cumplir una serie de requisitos para poder hacer este enfoque práctico e implementable.
 - Después de analizar y probar las ideas mediante simulaciones se selecciona la que de mejores resultados. El mejor resultado será valorado primero con la calidad del resultado (logrando la normalización de la transferencia, pero también la posibilidad de implementar el algoritmo de forma simple.
 - Se formaliza la idea con sustento matemático. Se pretende que el resultado obtenido sea claro matemáticamente. Con esto facilitar la asimilación del algoritmo para hacerlo práctico.
 - Se implementará la técnica en algunos modelos para mostrar que funciona y revisar las virtudes y desventajas.

CAPÍTULO 2

PRELIMINARES

2.1 ESTADO DEL ARTE

La revisión del estado del arte del diagnóstico de fallas es amplia, sin embargo, gracias a los libros que recientemente han sido publicados, ver por ejemplo, [7], [3], [4], [5], la revisión se puede hacer de forma mas directa. En los antes mencionados libros se presentan los métodos que de alguna forma cuentan con mayor atención por parte de la comunidad.

La revisión general de los algoritmos arroja que los grados de libertad disponibles para llevar a cabo una normalización están bastante limitados y generalmente el impacto mayor se puede tener sobre el estado estacionario, esto aún y cuando sea posible modificar la dinámica del generador de residuos. No se presenta en esta tesis una revisión detallada de cada método, mas bien, el esfuerzo será orientado directamente sobre la revisión de métodos para estimar fallas.

Para la estimación de fallas existen diversas propuestas en la literatura, como por ejemplo, el enfoque basado en optimización H_∞ [8]. Después del trabajo anterior, pasaron casi ocho años en los cuales se presentan enfoques de estimación de fallas basados en el uso de derivadas, hecho que por entonces no estaba bien visto. Un marco para estimar fallas utilizando técnicas de optimización fue propuesto en [9],

[10]. Otra idea basada en la inversión con enfoque geométrico fue propuesto en [11]. Alternativamente, en [12] se propone un estimador basado en observadores proporcionales. Diferentes enfoques consideran el uso de diferentes observadores adaptables [13], [14], [15], [16] y [17]; o con enfoques relacionados con la representación Takagi-Sugeno [18], [19], [20]; o con diferentes enfoques de observadores no lineales robustos [21], [22], [23], [24]. Los enfoques incluyen la consideración de sistemas lineales de parámetros variantes [25].

En esta tesis se utiliza un enfoque de inversión aproximada que se encuentra en la literatura propuesto en [26], el cual se describe de manera muy breve a continuación. La idea de utilizar inversión de un sistema dinámico para estimar una entrada es mostrada de forma esquemática en la figura 2.1

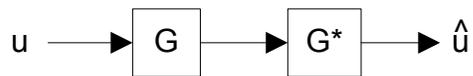


Figura 2.1: Concepto de inversión

donde u y \hat{u} representan a la entrada y la entrada estimada, mientras que la salida del sistema G es conectada en serie al aproximado del sistema inverso G^* y las variables u y \hat{u} son aproximadas. Se parecerán más en la medida en la que G^* se aproxime más a G , en algún sentido bien definido.

El algoritmo de inversión utilizado es descrito de manera muy breve, partiendo de la siguiente figura:

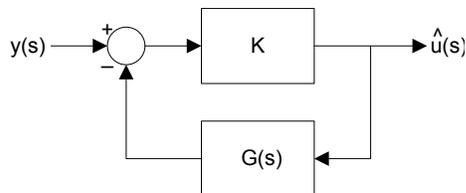


Figura 2.2: Diagrama esquemático de inversión para la transferencia G

De la figura 2.2 se tiene que:

$$G^*(s) = \frac{K}{1 + K \cdot G(s)} = \frac{K}{1 + K \cdot \frac{\text{ceros}}{\text{polos}}} = \frac{K \cdot \text{polos}}{\text{polos} + K \cdot \text{ceros}}. \quad (2.1)$$

De tal forma que los ceros de G^* son los polos de G (siempre, independiente de la magnitud de K) y que los polos dependen de K . Entonces si K es muy pequeña, los polos de G^* inician en los polos de G ; si K se incrementa y aproxima a infinito, los polos de G^* se aproximan a los ceros de G , resultando:

$$\lim_{K \rightarrow \infty} G^*(s) = \frac{\text{polos}}{\text{ceros}}. \quad (2.2)$$

Estrictamente hablando, la ecuación es un poco engañosa, porque sugiere que G^{-1} tiene tantos polos como ceros existen en G , lo cual no es el caso. Para cada ganancia de retroalimentación K , un sistema retiene el mismo número de polos; una G propia (n número de polos $\geq m$ número de ceros) debe entonces tener $n - m$ polos que no se aproximan a sus ceros pero que se mueven hacia el infinito mientras K se incrementa. Los polos adicionales añadidos a la inversa del sistema son bien recibidos porque ellos automáticamente hacen al sistema propio y por lo tanto implementable.

2.2 GENERACIÓN RESIDUAL

Para resolver el problema primero se revisó como se compone la generación residual y se encontró en la literatura que se encuentran diferentes métodos para determinar el generador de residuo, los cuales se pueden resumir como:

- Filtro de Detección de Fallas (FDF)
- Generador de Residuo basado en Relaciones de Paridad (PRRG)
- Observador Diagnóstico (DO)

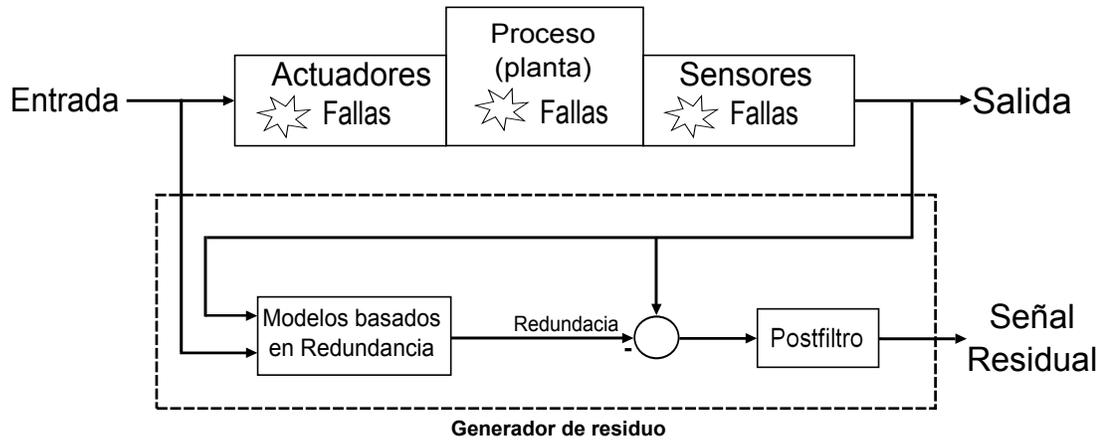


Figura 2.3: Descripción esquemática de la generación residual basada en modelos.

Como nuestro objeto de interés es el observador diagnóstico, se muestra a continuación en que consiste.

2.2.1 OBSERVADOR DIAGNÓSTICO (DO)

Gracias a su estructura flexible y similaridad al observador de Luenberger, es uno de los más investigados de los modelos generadores de residuo.

Este generador de residuo parte del observador de Luenberger de la salida descrito por:

$$\dot{z} = Gz + Hu + Ly, \quad (2.3)$$

$$\hat{y} = \bar{W}z + \bar{V}y + \bar{Q}u, \quad (2.4)$$

donde $z \in \mathbb{R}^\sigma$, σ denota el orden del observador y puede ser igual o menor o incluso mayor que el orden del sistema n .

2.2.2 OBSERVADOR DE ENTRADAS DESCONOCIDAS COMO BASE PARA LA ESTIMACIÓN DE LA FALLA

Asumimos que $G_{yu}(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$, entonces las matrices G , H , L , \bar{Q} , \bar{V} y \bar{W} junto con una matriz $T \in \mathfrak{R}^{s \times n}$ tienen que satisfacer las condiciones de diseño de Luenberger:

1. G es estable.
2. $TA - GT = LC$, $H = TB - LD$.
3. $C = \bar{W}T + \bar{V}C$, $\bar{Q} = D - \bar{V}D$.

Consideramos un sistema dinámico con $e = Tx - z$ como vector de estados y definimos a $y - \hat{y}$ como su salida y utilizando las condiciones dadas anteriormente, obtenemos:

$$\dot{e} = Ge, \quad y - \hat{y} = \bar{W}e. \quad (2.5)$$

Ahora pasamos a definir a el residuo como:

$$r = V^*(y - \hat{y}), \quad V^* \neq 0, \quad (2.6)$$

con lo cual se construye un vector de residuo, cuya dinámica esta dada por:

$$\dot{z} = Gz + Hu + Ly, \quad (2.7)$$

$$r = V^*y - V^*\bar{W}z - V^*\bar{V}y - V^*\bar{Q}u = Vy - Wz - Qu, \quad (2.8)$$

donde:

$$V = V^*(I - \bar{V}), \quad W = V^*\bar{W}, \quad Q = V^*\bar{Q}.$$

Entonces la condición de diseño (3) pasa a ser:

$$VC - WT = 0, \quad Q = VD. \quad (2.9)$$

CAPÍTULO 3

ESTIMACIÓN DE LA FALLA

3.1 DESCRIPCIÓN DEL CAPÍTULO

Este capítulo revela como se logra la estimación de la falla a partir de la inversa del generador de residuo. Para la inversión se utiliza el algoritmo propuesto en [26], el cual presenta un enfoque diferente a los métodos de inversión clásicos, utilizando este enfoque de inversión se pueden estimar fallas en donde la transferencia de la falla al residuo ya sea de fase mínima o de fase no mínima.

3.2 GENERACIÓN DEL RESIDUO

Para la generación del residuo partimos de un modelo, el cual su representación en variables de estado esta dado de la siguiente manera:

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

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + Ff(t), \quad (3.2)$$

Para el cuál se propone utilizar un generador de residuo de orden completo, con la siguiente forma, las cuales serán referidas como *ecuaciones de implementación*:

$$\dot{z}(t) = Gz(t) + Hu(t) + Ly(t), \quad (3.3)$$

$$r(t) = Vy(t) - Wz(t) - Qu(t), \quad (3.4)$$

Definimos como error de estimación, donde T es regular (es cuadrada e invertible):

$$e(t) = Tx(t) - z(t). \quad (3.5)$$

Además con las siguientes condiciones:

$$TA - GT = LC, \quad (3.6)$$

$$TB - LD = H, \quad (3.7)$$

$$WT = VC, \quad (3.8)$$

$$VD = Q, \quad (3.9)$$

donde:

$A \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $B \in \mathfrak{R}^{n \times p}$, $C \in \mathfrak{R}^{q \times n}$, $D \in \mathfrak{R}^{q \times p}$, $T \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $G \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $L \in \mathfrak{R}^{n \times q}$, $H \in \mathfrak{R}^{n \times p}$.

Se obtiene que el error de estimación:

$$\dot{e}(t) = Ge(t) + [TE - LF]f(t) \quad (3.10)$$

$$r(t) = We(t) + VFf(t) \quad (3.11)$$

donde las ecuaciones dadas en (3.10) y (3.11) son las *ecuaciones analíticas* las cuales representan la transferencia de la falla al residuo estas a su vez son equivalentes a las (3.3) y (3.4).

3.3 ESTIMACIÓN DE LA FALLA: IDEA GENERAL

Partiendo de la generación residual se tiene que hay dos expresiones, las cuales son equivalentes una de la otra (analítica e implementación). Como uno de los objetivos es conocer como afecta la falla al residuo, se ve en la necesidad de determinar la transferencia de la falla al residuo. Entonces, partiendo de de las ecuaciones del

error de estimación dadas en (3.10) y (3.11) se tiene que dicha transferencia esta dada por:

$$r(s) = [W (sI - G)^{-1} [TE - LF] + VF] f(s). \quad (3.12)$$

Como una posible solución (figura 3.1) para estimar la falla es invertir la generación residual (utilizando el método propuesto en [26]), entonces los ceros y polos de la transferencia de la falla al residuo (la cual siempre es posible determinarla), al invertirlas serían los polos y ceros respectivamente en el sistema invertido.

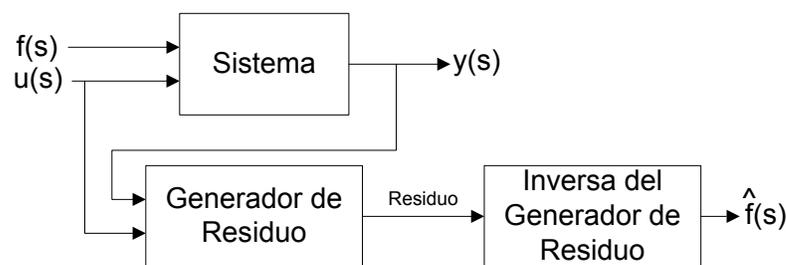


Figura 3.1: Esquema para lograr la estimación de la falla.

Con lo cual a partir de dicha transferencia, se enuncian dos casos que podrían complicar la inversión:

- Fase mínima
- Fase no mínima

3.4 ESTIMACIÓN DE FALLA: CASO DE FASE MÍNIMA

Una vez obtenido lo que es el residuo y determinada la transferencia y si esta resulta ser de fase mínima, nos lleva plantearnos el problema de estimación de falla.

3.4.1 PROBLEMA (ESTIMACIÓN DE FALLA)

Para un sistema con las ecuaciones (3.1) y (3.2), y un generador de residuos de orden completo como se propone en (3.3) y (3.4) donde se cumplen las condiciones (3.6), (3.7), (3.8), (3.9) y además que T es regular, encontrar un valor de ganancia K para:

$$\begin{aligned}\dot{p}(t) &= [G + (TE - LF)(I + KVF)^{-1}KW]p(t) + (TE - LF)(I + KVF)^{-1}Kr(t), \\ \hat{f}(t) &= (I + KVF)^{-1}Kr(t) - (I + KVF)^{-1}KWp(t),\end{aligned}$$

de manera que:

- El esquema sea internamente estable.
- $\hat{f}(t)$ converge asintóticamente a $f(t)$ hasta que que llegue a una región delimitada por ε y que de allí no salga es decir:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left| f(t) - \hat{f}(t) \right| < \frac{\delta}{t} \leq \varepsilon, \quad (3.13)$$

para cualquier $\varepsilon > 0$.

3.4.2 SUPUESTOS DE TRABAJO

1. El sistema no cuenta con ceros de fase no mínima.
2. $f(t)$ es acotada y al menos continua a tramos, sus cotas son conocidas.
3. Es de una entrada una salida (SISO)

Con lo cual podemos se plantea el siguiente teorema

Teorema 3.4.1 *Considerar el problema de estimación de falla, además de los supuestos anteriores del sistema entonces el problema tiene solución considerando*

$F = 0$ (es decir, si se consideran fallas en actuadores solamente) si:

$$KW (sI - G + TEKW)^{-1} TE \approx 1. \quad (3.14)$$

Prueba:

De las ecuaciones descritas en (3.10) y (3.11) además de las ecuaciones definidas en el problema, se tiene que en el dominio de Laplace:

$$\begin{aligned} p(s) &= (sI - \bar{A})^{-1} (TE - LF) (I + KVF)^{-1} Kr(s), \\ e(s) &= (sI - G)^{-1} (TE - LF) f(s), \\ \bar{A} &= G + (TE - LF)(I + KVF)^{-1} KW, \end{aligned}$$

Entonces en el dominio de Laplace:

$$\hat{f}(s) = (I + KVF)^{-1} Kr(s) - (I + KVF)^{-1} KWp(s)$$

Considerando $F = 0$

$$\begin{aligned} \hat{f}(s) &= Kr(s) - KWp(s), \\ \hat{f}(s) &= Kr(s) - KW (sI - \bar{A})^{-1} (TE) Kr(s), \\ \hat{f}(s) &= K \left[I - W (sI - \bar{A})^{-1} TEK \right] r, \\ \hat{f}(s) &= K \left[I - W (sI - \bar{A})^{-1} TEK \right] [We(s)], \\ \hat{f}(s) &= K \left[I - W (sI - \bar{A})^{-1} TEK \right] W (sI - G)^{-1} TEf(s), \\ \hat{f}(s) &= K \left[W (sI - G)^{-1} TE - W (sI - \bar{A})^{-1} TEKW (sI - G)^{-1} TE \right] f(s), \\ \hat{f}(s) &= KW \left[(sI - G)^{-1} TE - (sI - \bar{A})^{-1} TEKW (sI - G)^{-1} TE \right] f(s), \\ \hat{f}(s) &= KW \left[I - (sI - \bar{A})^{-1} TEKW \right] (sI - G)^{-1} TEf(s), \\ \hat{f}(s) &= KW \left[I - (sI - G + TEKW)^{-1} TEKW \right] (sI - G)^{-1} TEf(s), \\ \hat{f}(s) &= KW \left[(sI - G + TEKW)^{-1} (sI - G + TEKW - TEKW) \right] (sI - G)^{-1} TEf(s), \\ \hat{f}(s) &= KW \left[(sI - G + TEKW)^{-1} (sI - G) \right] (sI - G)^{-1} TEf(s), \\ \hat{f}(s) &= KW (sI - G + TEKW)^{-1} TEf(s). \end{aligned}$$

Comparando \hat{f} con $f(s)$

$$\begin{aligned} f(s) - \hat{f}(s) &= [f(s) - KW(sI - G + TEKW)^{-1}TEf(s)], \\ f(s) - \hat{f}(s) &= [I - KW(sI - G + TEKW)^{-1}TE]f(s), \\ \frac{f(s) - \hat{f}(s)}{f(s)} &= I - KW(sI - G + TEKW)^{-1}TE, \\ \frac{f(s) - \hat{f}(s)}{f(s)} &= I - \frac{KWTE}{s - G + TEKW}, \\ \frac{f(s) - \hat{f}(s)}{f(s)} &= I - \frac{KWTE}{\frac{s-G}{K} + KTEW}. \end{aligned}$$

Si $K \gg 1$ entonces:

$$\frac{f(s) - \hat{f}(s)}{f(s)} = I - \frac{WTE}{TEW}. \quad (3.15)$$

$$(3.16)$$

Donde:

$$\frac{WTE}{TEW} = 1.$$

Bajo la consideración de fallas en actuadores y sensores, se plantea el siguiente teorema.

Teorema 3.4.1 *Dadas las ecuaciones (3.10) y (3.11), considerando el problema de estimación de falla, además de los supuestos anteriores del sistema entonces el problema tiene solución para:*

$$K \gg 1. \quad (3.17)$$

Prueba:

$$G_r(s) = W(sI - G)^{-1}(TE - LF) + VF, \quad (3.18)$$

$$G_r(s) = \frac{num}{den}, \quad (3.19)$$

$$G_r^{-1}(s) = \frac{K}{1 + KG_r(s)}, \quad (3.20)$$

$$G_r^{-1}(s) = \frac{K}{1 + K \frac{num}{den}}, \quad (3.21)$$

$$G_r^{-1}(s) = \frac{K(den)}{den + Knum}. \quad (3.22)$$

$$(3.23)$$

Si $K \gg 1$ entonces:

$$G_r^{-1}(s) = \frac{den}{num}. \quad (3.24)$$

3.5 ESTIMACIÓN DE FALLA: CASO DE FASE NO MÍNIMA

Si la transferencia de la falla al residuo, resulta tener al menos un cero de fase no mínima, se complica la inversión dado que al invertirlo, este cero sería el polo, lo cual volvería a la inversa inestable. Para lograr la inversión se propone a continuación un algoritmo el cual utiliza el principio de superposición para separar la transferencia en dos, las cuales son de fase mínima e invertibles.

Si la transferencia de la falla al residuo esta dada por $G(s)$, considerar lo siguiente:

$$G_{trasf}(s) = \frac{cero_{trasf}(s)}{polo_{trasf}(s)} = G_1(s) - G_2(s), \quad (3.25)$$

donde: $G_1(s)$ y $G_2(s)$ son de fase mínima.

El esquema de solución propuesto se muestra en la figura 3.5.

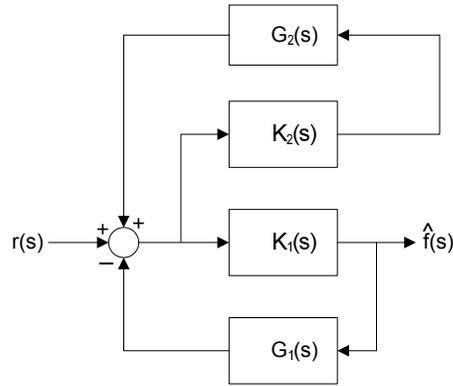


Figura 3.2: Esquema de solución propuesto para los casos de fase no mínima

$$\hat{f} = K_1(1 + G_1K_1 - G_2K_2)^{-1}r \quad (3.26)$$

$$\hat{f} = \left(K_1 + G_1 - G_2 \frac{K_2}{K_1} \right)^{-1} r \quad (3.27)$$

Donde: K_1 y K_2 no son necesariamente iguales

3.5.1 ALGORITMO 1

En esta sección se muestra una propuesta de un algoritmo para la estimación de sistemas de fase no mínima:

1. Dada la transferencia de la falla al residuo representada por $G(s)$ se seleccionan $G_1(s)$ y $G_2(s)$ de manera que cumplan (3.25).
2. Definimos G_{approx} la cual esta dada por el producto de $G(s)$ por un filtro pasa todo inestable polos en el RHSTZs (*right hand side transmission zeros*) y ceros en su contra parte con respecto a el eje imaginario.
3. Definimos la ganancia K_1 .
4. Aproximamos: $K_1 + G_1 - G_2 \frac{K_2}{K_1}$ a G_{approx} , donde K_2 toma el valor de la constante.

5. Sí K_2 es igual a 0, es preciso seleccionar un K_1 diferente y repetir el paso anterior, de lo contrario la selección de las ganancias a sido exitosa.

3.5.2 ALGORITMO (BUCHHOLZ, GRÜNHAGEN, 2008)

1. Determinar el/los cero(s) del sistema.
2. Determinar un filtro pasa todo con los ceros en un su valor de la contra parte con respecto al eje imaginario, el cual será utilizado como pre-filtro.
3. Utilizar el método de inversión como lo describe la figura 3.3

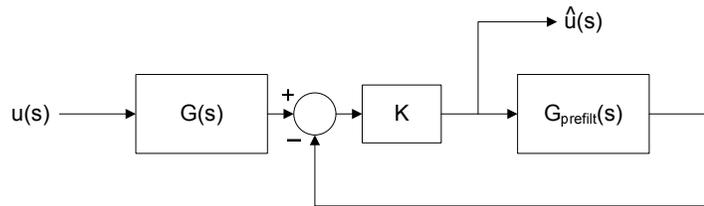


Figura 3.3: Algoritmo para sistemas de fase no mínima

4. K debe de elegirse de tal forma que cumpla lo siguiente:

$$r^*(s) = \frac{y}{\hat{u}} = \frac{K}{1 + K \cdot G(s)} = \frac{K}{1 + K \cdot \frac{zeros}{poles}} = \frac{K \cdot poles}{poles + K \cdot zeros} \quad (3.28)$$

donde $r(s)$ denota la transferencia de la falla al residuo. Entonces K :

$$\lim_{K \rightarrow \infty} r^*(s) = \frac{poles}{ceros}. \quad (3.29)$$

CAPÍTULO 4

EJEMPLOS DEL USO DEL ALGORITMO EN DIVERSOS CASOS

4.1 MODELO LINEALIZADO DEL SISTEMA DE CONTROL DE POSICIÓN DE UN SATÉLITE

Con la finalidad de mostrar el potencial del esquema considerado se considera un ejemplo. Se considera el modelo linealizado del sistema de control de posición de un satélite, el cual ha sido previamente utilizado en [27].

Considerar el siguiente sistema lineal:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) + Ff(t) \quad (4.1)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (4.2)$$

donde $x^T(t) = \begin{bmatrix} \dot{\phi}(t) & \dot{\theta}(t) & \dot{\psi}(t) & \phi(t) & \theta(t) & \psi(t) \end{bmatrix}$ es el vector de estado con $\phi(t)$, $\theta(t)$ y $\psi(t)$ representando los ángulos de guiada, balanceo y cabeceo respectivamente y $\dot{\phi}(t)$, $\dot{\theta}(t)$ y $\dot{\psi}(t)$ son las correspondientes velocidades angulares. La entrada de control consta de tres elementos asociados con fuerzas en cada dirección: $u^T(t) = [L_x \ L_y \ L_z]$; la perturbación $d(t)$ consiste en incertidumbre del modelo:

$$d(t) = [0.0001 \ 0.0002 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]x(t), \quad (4.3)$$

y las matrices del sistema:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2.5 \times 10^{-4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.43 \times 10^{-4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0125 & 0 & 0 \\ 0 & 0.011 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0143 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad F = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

F es igual a la primer columna de B y C es la matriz identidad de orden 6 (todos los estados están disponibles para medición. Este sistema es inestable en lazo abierto (dado que los valores propios: $\lambda = 1.0 \times 10^{-3} [0.0000 + 0.0000i, 0.0000 + 0.0000i, 0.0000 + 0.1891i, 0.0000 - 0.1891i, 0.0000 + 0.0000i, 0.0000 + 0.0000i]$), con lo que para poder realizar la tarea de diagnóstico es necesario primero estabilizarlo mediante una retroalimentación de estado dada por:

$$u(t) = K_x x(t) + K_{ref} r(t), \quad (4.4)$$

con

$$K_x = \begin{bmatrix} 260 & 0 & 0.02 & 200 & 0 & 0 \\ 0 & 295.4 & 0 & 0 & 204.5 & 0 \\ -0.006 & 0 & 273.3 & 0.0045 & 0 & 183.6 \end{bmatrix}; \quad (4.5)$$

$$K_x = \begin{bmatrix} 200 & 0 & 0 \\ 0 & 204.5 & 0 \\ 4.88 \times 10^{-3} & 0 & 183.6 \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

Las ganancias anteriores permiten la ubicación de los polos de lazo cerrado en: $-1, -1.25, -1.5, -1.75, -2, -2.5$, para una referencia dada con fines de mostrar el algoritmo en $r_{ref}^T(t) = [-0.5 \ 0.5 \ 1]$, dados para las posiciones angulares. El comportamiento nominal del sistema sin fallas y/o perturbaciones se puede apreciar en la figura 4.1.

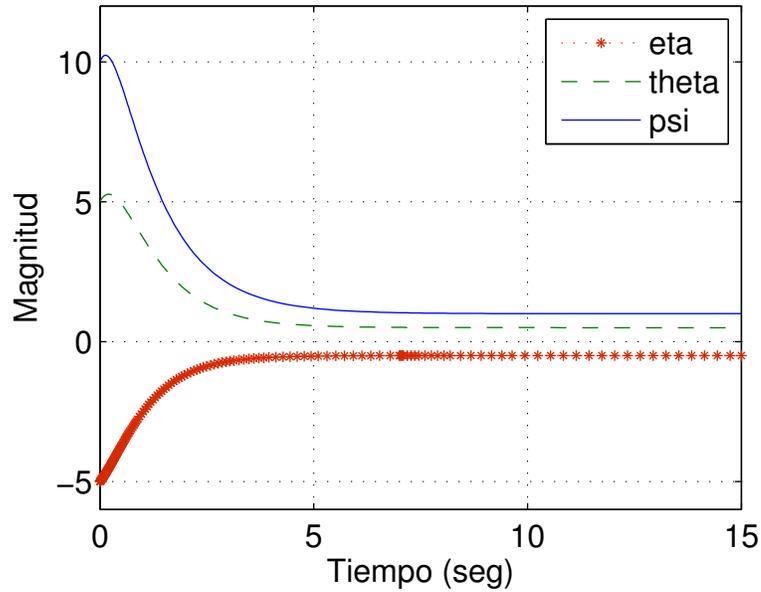


Figura 4.1: Evolución nominal de las posiciones sin perturbaciones ni fallas.

Para el cual se propone el siguiente generador de residuo:

$$G = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3.2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -3.3 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -3.4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -3.5 \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

$$L = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.00025 & 0 & 3.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.5 \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

$$H = \begin{bmatrix} 0.0125 & 0 & 0 \\ 0 & 0.011 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.9)$$

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

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.11)$$

Realizando el desacoplo para la falla que queremos estimar, se tiene que:

$$Mr = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -3.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.12)$$

$$Wr = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.13)$$

$$Lr = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.14)$$

$$Hr = \begin{bmatrix} 0.0125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.15)$$

(4.16)

Además de las ecuaciones para implementación del generador de residuos, como dadas en el capítulo de estimación de fallas, la ecuación de la dinámica del estimador de residuos resulta en:

$$\dot{e}(t) = Ge(t) + [TE - LF]f(t), \quad (4.17)$$

$$r(t) = We(t) + Vf(t). \quad (4.18)$$

El cual para nuestro caso corresponde a la siguiente transferencia de la falla al residuo:

$$r(s) = \frac{0.0125s + 0.05375}{s^2 + 6.3s + 9.9}f(s). \quad (4.19)$$

Note que en estado estacionario (suponiendo una entrada constante) resulta en una transferencia con ganancia de $\frac{1}{184.18}$, con lo que se hace deseable hacer algo para poder tener acceso al diagnóstico de fallas pequeñas. El efecto de una falla de magnitud 1 sobre el residuo se puede apreciar en la figura siguiente:

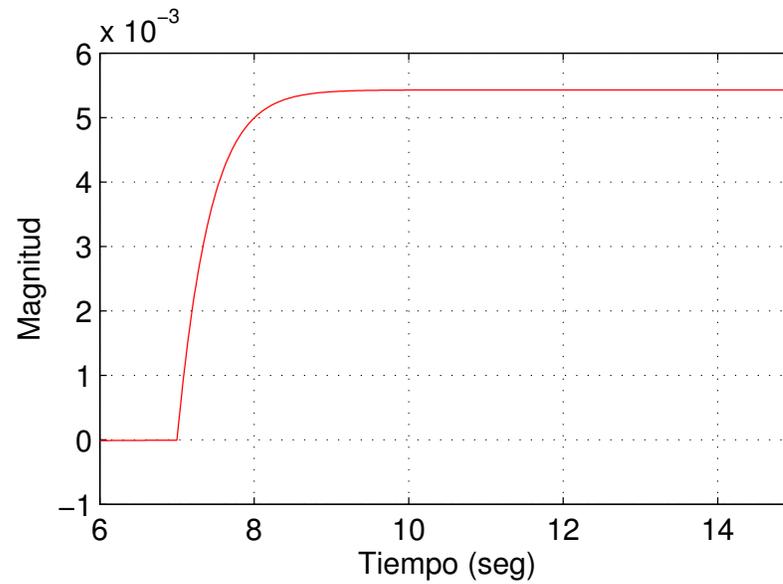


Figura 4.2: Evolución del residuo ante la falla en la posición ϕ de magnitud 1.

La evolución del estimador para una falla de magnitud 1 en el tiempo igual a 7 segundos se puede apreciar en figuras 4.3 y 4.4 con ganancia de $K = 1,000$ y $K = 10,000$ respectivamente.

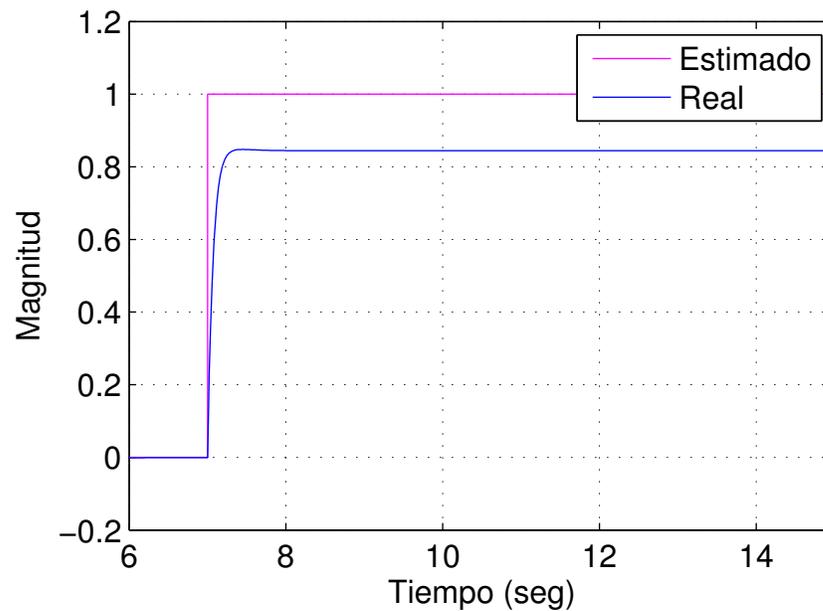


Figura 4.3: Estimado de la falla usando $K = 1000$.

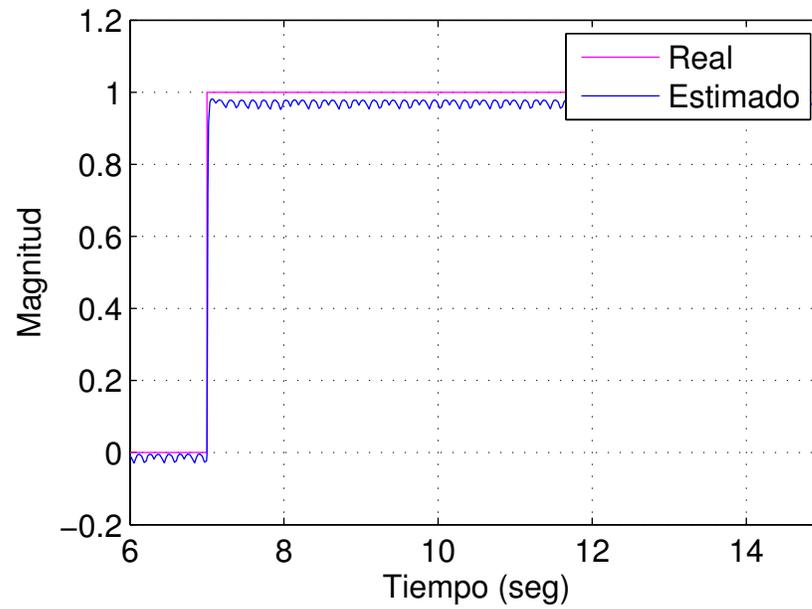


Figura 4.4: Estimado de la falla usando una $K = 10,000$.

Para ver con mayor como cambia la estimación al elegir una K mucho más grande, se muestra en las figuras (4.5) y (4.6) las gráficas del error de estimación

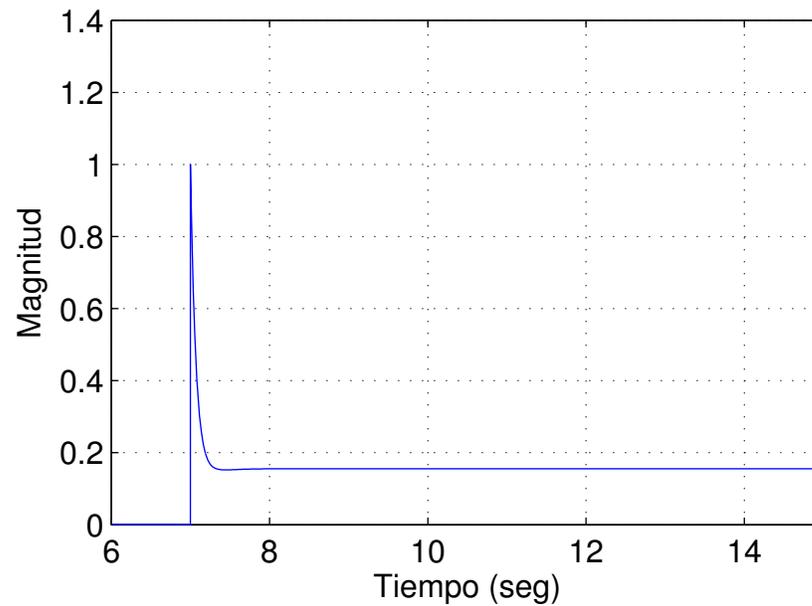


Figura 4.5: Error de estimación una $K = 1,000$.

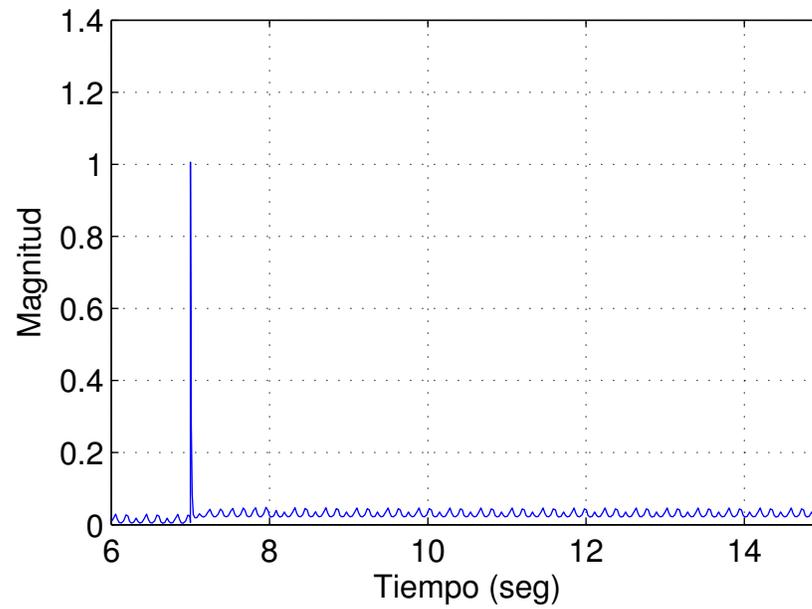


Figura 4.6: Error de estimación utilizando una $K= 10,000$.

4.2 CALENTADOR DE TANQUE CONTINUAMENTE AGITADO (CONTINUOUS STIRRED TANK HEATER)

Dado el siguiente modelo lineal tomado del libro [4]

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -626.4371 & -5.9406 \times 10^{-3} & 36.55 \\ 0 & 0 & -1.2019 - 5.9406 \times 10^{-3} \end{bmatrix}, \quad (4.20)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 30411.5241 \end{bmatrix}, \quad (4.21)$$

$$C = \begin{bmatrix} 31.831 & 0 & 0 \\ 0 & 3.8578 \times 10^{-5} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.22)$$

Y la matriz de falla del sistema es:

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.23)$$

Entonces, como la planta es inestable, primero se estabiliza colocando los polos en -1 , -2 , -3 utilizando K_{estab} definida a continuación:

$$K = \begin{bmatrix} 0.7864 & 0.0072 & 0.0127 \\ -0.0024 & 9.41 \times 10^{-06} & 0.0002 \end{bmatrix}. \quad (4.24)$$

Desacoplando el sistema original se tiene:

Subsistema 1:

$$\dot{x}_1 = u_1, \quad (4.25)$$

$$y_1 = 31.831x_1, \quad (4.26)$$

Subsistema 2:

$$\dot{x}_2 = -626.4371x_1 - 5.9406 \times 10^{-3}x_2 + 36.55x_3, \quad (4.27)$$

$$y_2 = 3.8578 \times 10^{-5}x_2 + f_2. \quad (4.28)$$

Subsistema 3:

$$\dot{x}_3 = 1.2019 \times 10^{-3}x_3 + 30411.5241u_2, \quad (4.29)$$

$$y_3 = x_3 + f_3. \quad (4.30)$$

Ahora utilizando las ecuaciones de estado del subsistema 3, generamos el residuo como se plantea:

$$\dot{z} = Gz + Hu + Ly, \quad (4.31)$$

$$r = Vy - Wz - Qu. \quad (4.32)$$

Definiendo el error como:

$$e = Tx - z. \tag{4.33}$$

Donde la función de transferencia de la falla al residuo esta dada por:

$$r = [W(s - G)^{-1}(-LF) + VF] f_3. \tag{4.34}$$

Para(4.31) y (4.32), seleccionando, $G = -4$ entonces se tiene que $T = 1$, $L = 4.0012$, $W = 1$, $V = 1$, y $Q = 0$.

La transferencia de la falla al residuo para este caso es:

$$G(s) = \frac{s - 0.0012}{s + 4}. \tag{4.35}$$

El residuo de planta al aplicarle una falla se muestra en la figura 4.7

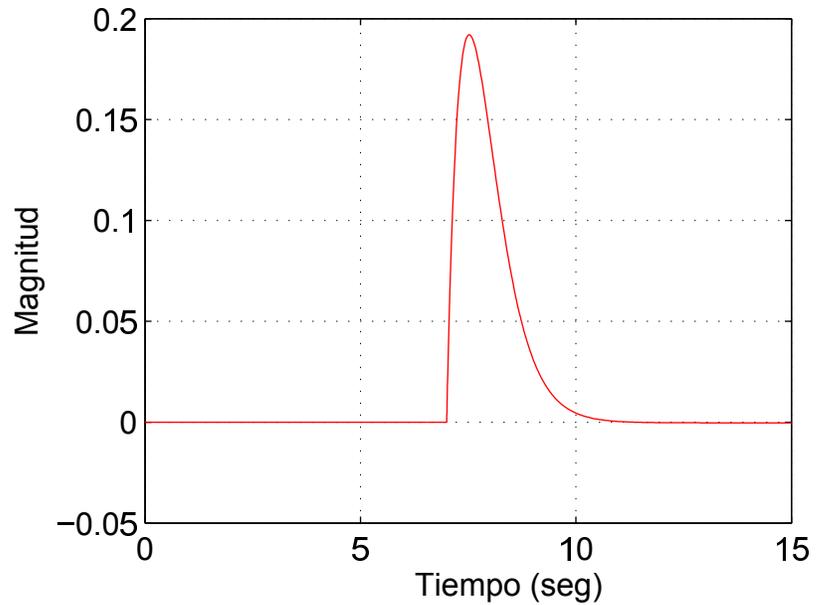


Figura 4.7: Residuo obtenido al tener una falla en el segundo 7.

Donde la estimación de la falla con una ganancia de 1,000 y 10,000:

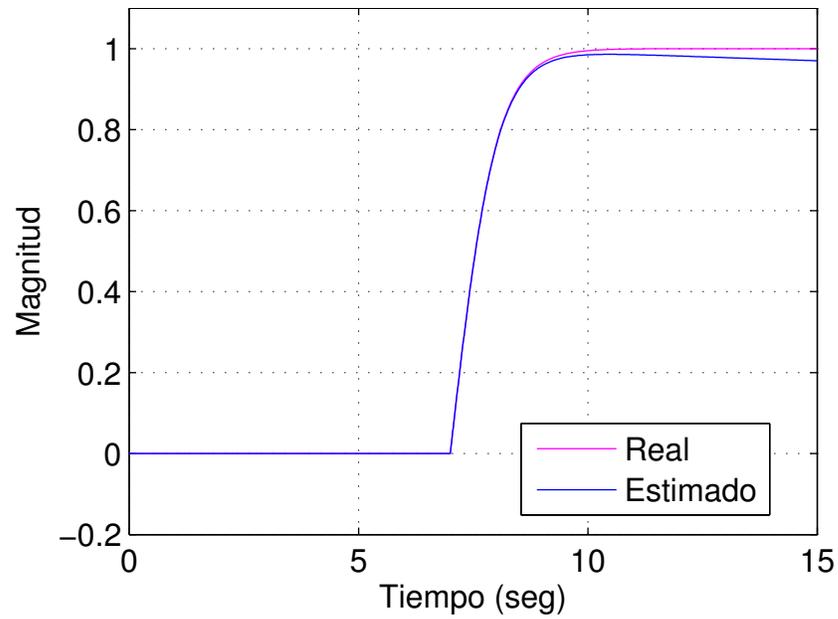


Figura 4.8: Estimación de la falla con $K = 1,000$.

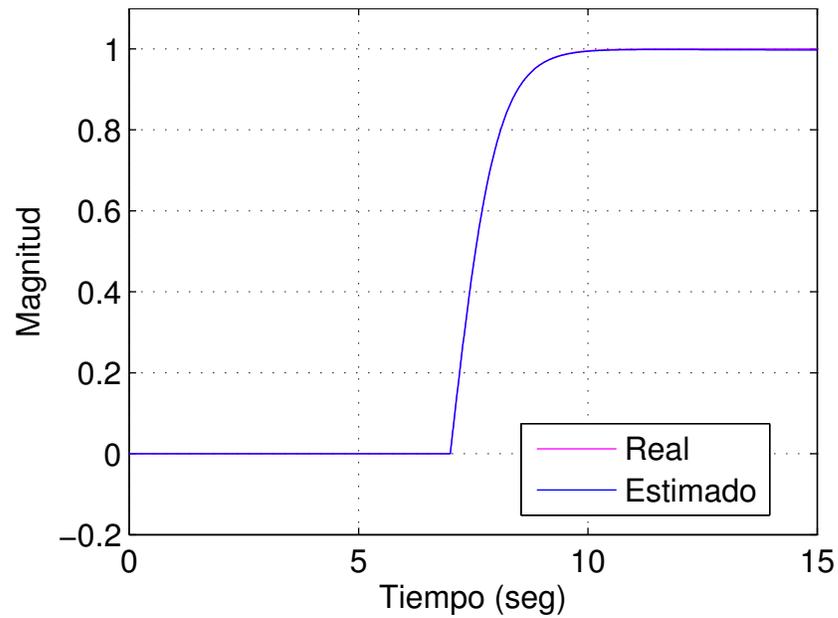
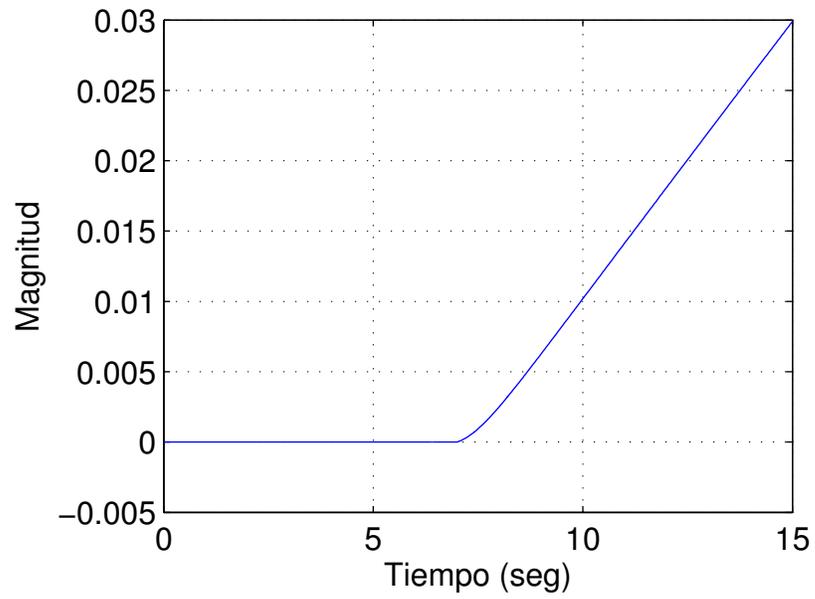
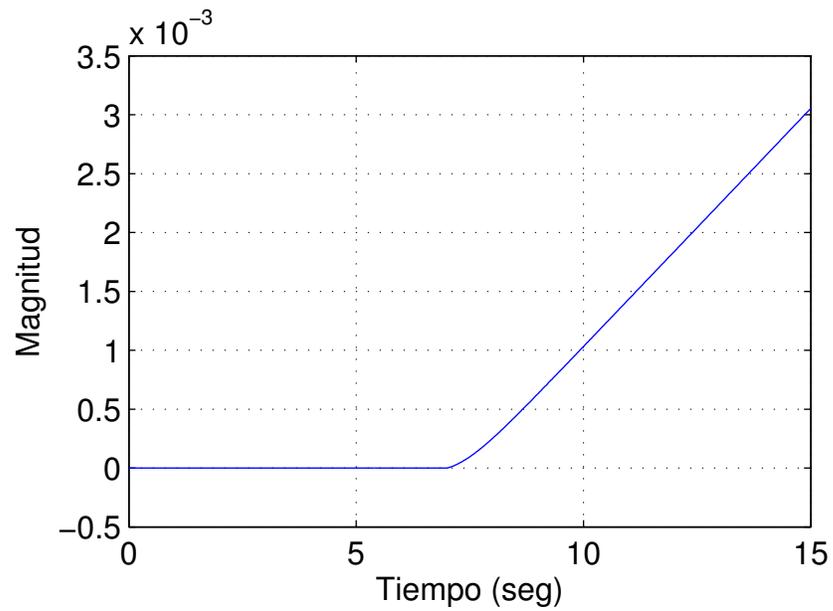


Figura 4.9: Estimación de la falla con $K = 10,000$.

Y el error de la estimación de la falla con una ganancia de 1,000 y 10,000:

Figura 4.10: Error de la estimación de la falla con $K = 1,000$.Figura 4.11: Error de la estimación de la falla con $K = 10,000$.

Utilizando el algoritmo 1:

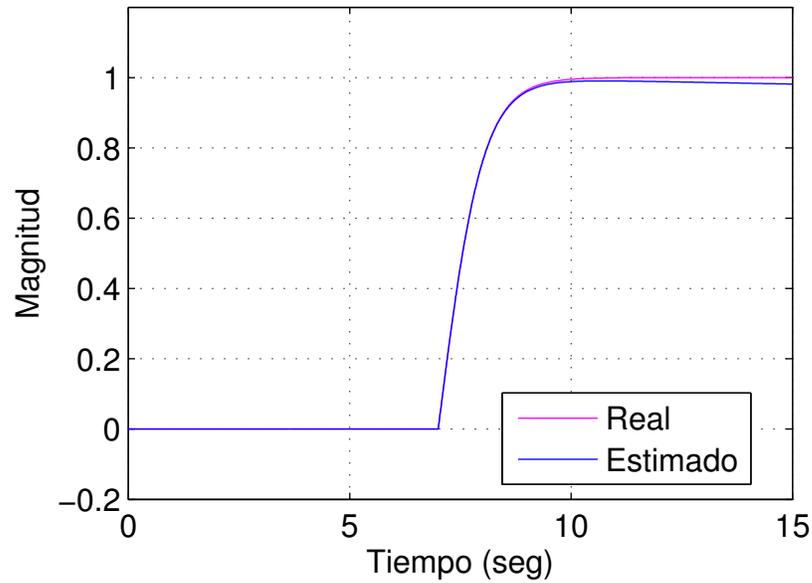


Figura 4.12: Error de la estimación de la falla con $K_1 = 1,000$ y $K_2 = \frac{7.0028}{0.0070012}$.

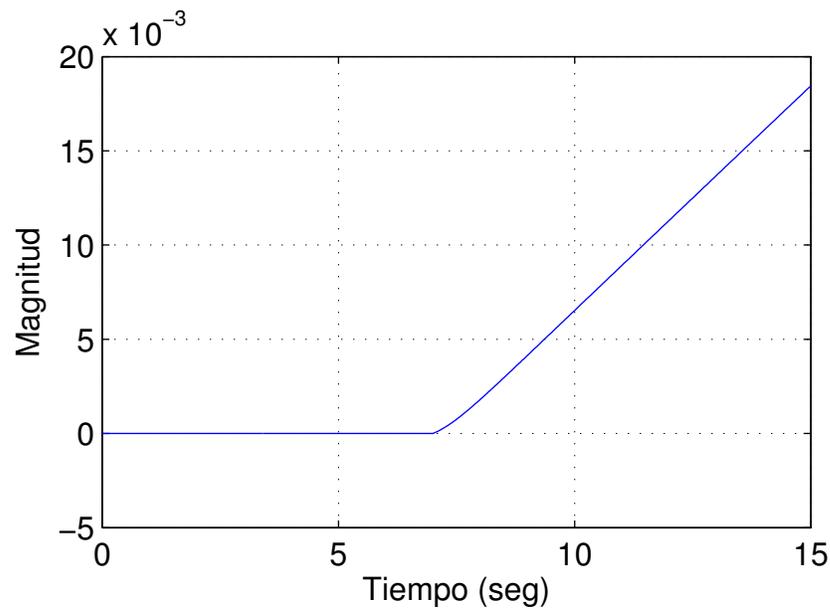


Figura 4.13: Error de la estimación de la falla con $K_1 = 1,000$ y $K_2 = \frac{7.0028}{0.0070012}$.

Como se puede ver el algoritmo 1 tiene un mejor desempeño reduciendo de forma significativa el error como se puede ver en la figura 4.2 a comparación del

propuesto en [26] el cual tiene un error como se muestra en la figura 4.2.

4.3 EJEMPLO ACADÉMICO

Partiendo que se tiene la siguiente transferencia de la falla al residuo:

$$G = \frac{s-1}{s+5}. \quad (4.36)$$

Usando (3.25)

$$G_1 = \frac{s+6}{s+5}, \quad (4.37)$$

$$G_2 = \frac{7}{s+5}. \quad (4.38)$$

Multiplicando a (4.36) por un pre-filtro pasa-todo:

$$\frac{s+1}{s-1}. \quad (4.39)$$

Obtenemos que (4.36) con el pre-filtro (4.39)

$$G_{prefilt} = \frac{s+1}{s+5}. \quad (4.40)$$

A la G dada en (4.40) es a la cual aproximaremos nuestra inversión.

Para una $K_1 = 1,000$ partiendo de (3.26), resolviendo para el denominador:

$$\begin{aligned} \frac{1}{1,000} + \frac{s+6}{s+5} - \frac{K_2}{1,000} \frac{7}{s+5} &= \frac{s+1}{s+5}, \\ 0.001(s+5) + s+6 - 0.007K_2 &= s+1, \\ 0.001s - 0.007K_2 &= 1 - 0.005 - 6, \\ K_2 &= \frac{5.005}{0.007}. \end{aligned}$$

Para una $K_1 = 10$

$$\frac{1}{10} + \frac{s+6}{s+5} - \frac{K_2}{10} \frac{7}{s+5} = \frac{s+1}{s+5},$$

$$\begin{aligned}0.1(s + 5) + s + 6 - 0.7K_2 &= s + 1, \\0.1s - 0.7K_2 &= 1 - 0.5 - 6, \\K_2 &= \frac{5.5}{0.7}.\end{aligned}$$

4.3.1 COMPARACIÓN DE LOS ALGORITMOS PARA SISTEMAS DE FASE NO MÍNIMA

Para hacer comparación rápida en los dos algoritmos mostrados, se plantea utilizar el ejemplo de aplicación mostrado anteriormente, es decir, la inversión de una transferencia dada en (4.36). Para esto se propone estimar la señal mostrada en (4.14).

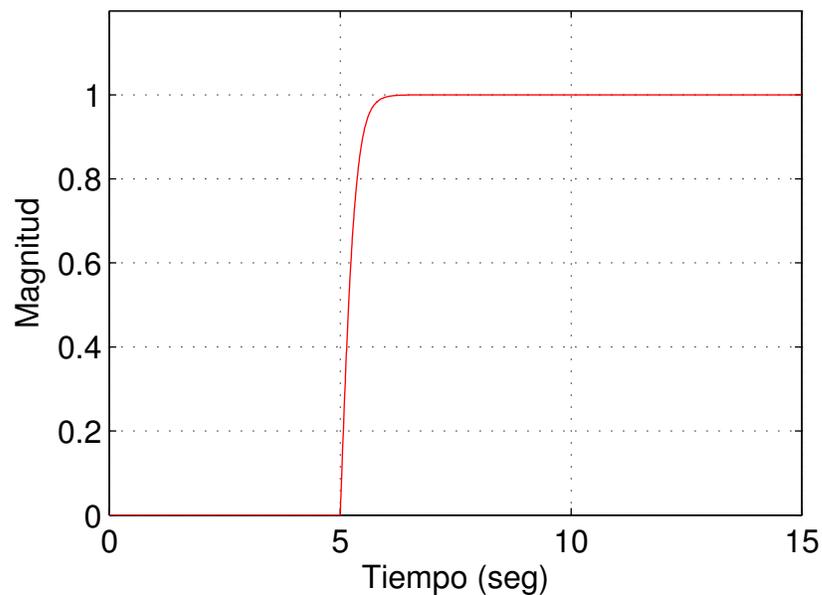


Figura 4.14: Entrada a estimar mediante algoritmos para sistemas de fase no mínima.

Para la estimación se utilizarán los valores obtenidos en el ejemplo de aplicación, en la figura (4.15) se observa como los errores tienen el mismo tiempo de

convergencia, además de la magnitud de error máxima mientras que en la figura (4.16) se observa como la magnitud del error máximo es menor pero tarda un poco más en converger a cero. Como se puede observar en la figura (4.15) y (4.16) el error obtenido por Buchholz, Grünhagen, no llega a ser cero si no que este se estabiliza en un valor inferior a este.

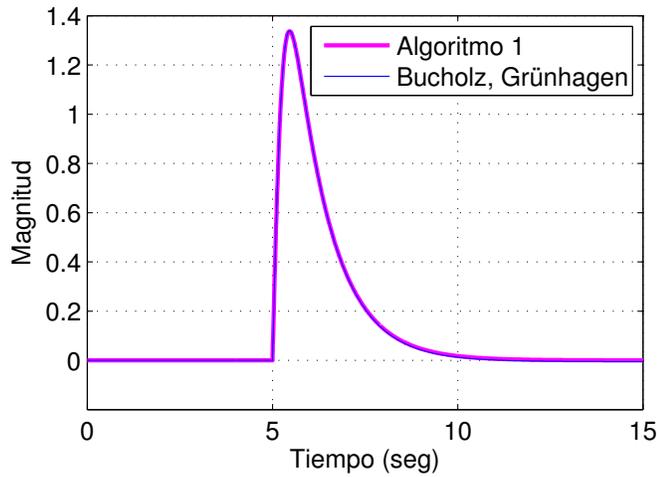


Figura 4.15: Error de estimación de la entrada usando como $K_1 = 1,000$ y $K_2 = \frac{5.005}{0.007}$ para el algoritmo 1 y $K = 1,000$ para Buchholz, Grunhagen.

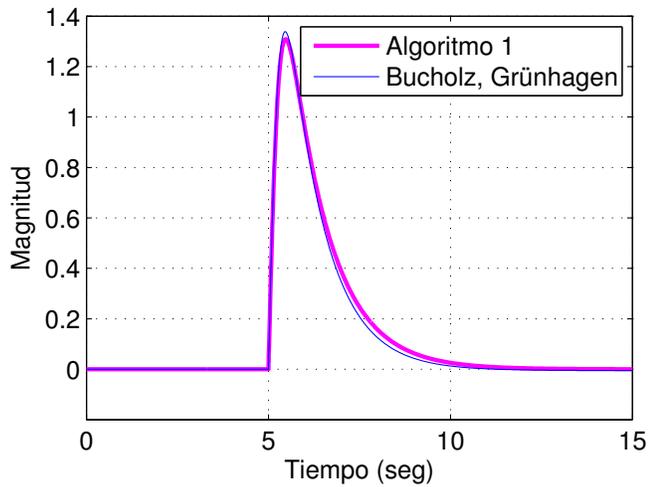


Figura 4.16: Error de estimación de la entrada usando como $K_1 = 10$ y $K_2 = \frac{5.5}{0.7}$ para el algoritmo 1 y $K = 1,000$ para Buchholz, Grunhagen.

En la figura (4.16) puede verse como al utilizar el algoritmo 1, puede lograrse una buena estimación al utilizar una ganancia pequeña ($K_1 = 10$ y $K_2 = \frac{5.5}{0.7}$), dicha estimación resulta comparable a la obtenida por el método propuesto en [26], utilizando una ganancia grande ($K = 1000$).

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

La problemática de ganancia de la transferencia de la falla al residuos es considerada en este trabajo. En lugar de ver la manera de trabajar la posibilidad de modular esta ganancia, en este trabajo se propone una forma de estimar la falla mediante un enfoque de inversión del generador de residuo. El enfoque tiene limitaciones estructurales, sin embargo, si las condiciones de existencia se satisfacen, la falla se puede estimar de manera conveniente y sin retraso significativo. El retraso de la estimación producido por el enfoque, requiere de ser evaluado para revisar la viabilidad en cada caso.

En general se tiene que seleccionando un valor de K grande se obtiene un error de estimación de la falla muy pequeño.

Al invertir sistemas de fase no mínima, la inversión se realiza mediante un algoritmo el cual separa al sistema de fase no mínima en dos de fase mínima, con el cual se puede lograr una buena estimación aún cuando la ganancia de K_1 sea elegida pequeña. Sin embargo, la estimación solo se puede lograr en estado estacionario.

Los sistemas propios y estrictamente propios pueden ser tratados sin mayor problema siguiendo el algoritmo de inversión, cuidando solamente de que en la transferencia no se tengan ceros sobre el eje $j\omega$, dado que no se logra una inversión satisfactoria.

Como trabajo futuro queda el manejo de sistemas no lineales así como un estudio basado en experimentos y/o comparación con otros métodos, al igual que una mejor determinación del valor de K en función del error en estado estacionario, además, de determinar que hacer cuando la transferencia tiene cero(s) sobre o próximos sobre el eje $j\omega$.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. G. Luenberger. Observing the state of a linear system. *IEEE Transactions on Military Electronics*, 1964.
- [2] R. V. Beard. *Failure Accomodation in Linear Systems Through Self-Reorganization*. Ph.D. Dissertation, M.I.T., 1971.
- [3] J. Chen and R. J. Patton. *Robust model based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer Academic Publishers Group, 1999.
- [4] S. X. Ding. *Model-based fault diagnosis techiques*. Springer, 2013.
- [5] R. Isermann. *Fault-diagnosis systems: An introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer, 1 edition, November 2006.
- [6] P. M. Frank. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey. *Automatica*, 26:459–474, 1990.
- [7] M. Blanke, M. Kinnaert, and J. Lunze M. Staroswiecki. *Diagnosis and fault-tolerant ontrol*. Springer, Berlin Germany, 2nd edition, 2006.
- [8] P. M. Frank and S. X. Ding. Frequency domain approach to optimally robust residual generation and evaluation for model based fault diagnosis. *Automatica*,, 30(5):789–804, 1994.
- [9] J. Stoustrup and H.Niemann. Fault estimation - a standard problem approach. *Int. J. Robust Nonlinear Control*, 12:649–673, 2002.

-
- [10] S. Mohsen, N. Soltani, R. Izadi-Zamanabadi, and J. Stoustrup. Parametric fault estimation based on h1 optimization in a satellite launch vehicle. In *In 17th IEEE International Conference on Control Applications, Part of 2008 IEEE Multi conference on Systems and Control*, 2008.
- [11] A. Edelmayer. Fault detection in dynamic systems: From state estimation to direct input reconstruction methods. Master’s thesis, Ph.D. thesis, Dr.Sc Hungry Academy of Sciences, 2005.
- [12] Z. Gao and S. X. Ding. Fault estimation and fault tolerant control for descriptor systems via proportional, multiple-integral and derivative observer design. *IET Control Theory Appl.*, 5(1):1208–1218, 2007.
- [13] K. Zhang, B. Jiang, and V. Coquempot. Adaptive observer-based fast fault estimation. *International Journal of Control, Automation, and Systems.*, 6(3):320–326, 2008.
- [14] K. Zhang, B. Jiang, and V. Cocquempot. Fast adaptive fault estimation and accommodation for nonlinear time varying delay systems. *Asian Journal of Control.*, 11(6):643–652, 2009.
- [15] F. B. Hmida, K. Khemiri, J. Ragot, and M. Goss. Robust filtering for state and fault estimation of linear stochastic systems with unknown disturbance. *Mathematical Problems in Engineering.*, Vol. 2010(Article ID 591639):24 pages., 2010.
- [16] D. Du, B. Jiang, and P. Shi. Fault estimation and accommodation for switched systems with time-varying delay. *International Journal of Control, Automation, and Systems.*, 9(3):442–451., 2011.
- [17] Z. Cen, H. Noura, and Y. A. Younes. Systematic fault tolerant control based on adaptive thau observer estimation for quadrotor uavs. *International Journal of Applied Mathematics and Computing Science*, 25(1):1–10., 2015.

-
- [18] R. Chaloo and S. Dubey. Simultaneous state and actuator fault estimation with fuzzy descriptor pmid and pd observers for satellite control systems. *International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*, 2(5):1–10., 2011.
- [19] H. Gassara, A. E. Hajjaji, and M. Chaabane. Actuator fault estimation with pole placement constraints for takagi-sugeno fuzzy systems with interval time varying delay: An lmi approach. In *In EUSFLATLFA, European Society For Fuzzy Logic.*, Aix Les Bains, France., July 18-22, 2011 2011.
- [20] K. Zhang, B. Jiang, P. Shi, and J. Xu. Analysis and design of robust h fault estimation observer with finite-frequency specifications for discrete-time fuzzy systems. *IEEE Transactions on Cybernetics.*, 45(7):1225–1235, July 2014.
- [21] Z. Mao, B. Jiang, P. Shi, and V. Cocquempot. High gain observer-based fault estimation for nonlinear networked control systems. In *American Control Conference*, Seattle, Washington, USA., 2008.
- [22] D. Huang and S. K. Nguang. Fault estimation for uncertain nonlinear networked control systems. *The Open Automation and Control Systems Journal.*, 2(1):32–44., 2009.
- [23] D. Sigalov and Y. Oshman. A new formulation of fault-tolerant estimation problems and some solutions. In *Electrical and Electronics Engineers in Israel (IEEEI), 2010 IEEE 26th Convention of.*, pages 626–630., Israel, 2010.
- [24] S. Montes de Oca, D. Rotondo, F. Nejjari, and V. Puig. Fault estimation and virtual sensor ftc approach for lpv systems. In *50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. IEEE.*, Orlando, Florida, USA., 2011.
- [25] B. Kulcsar and M. Verhaegen. Robust inversion based fault estimation for discrete-time lpv systems. *IEEE Transactions on Automatic Control.*, 57(6):1581–1586., 2012.

-
- [26] J. J. Buchholz and W. v. Grünhagen. Inversion impossible? Technical report, University of Applied Sciences Bremen, Germany, 2008.
- [27] J. H. Luan and T. D. Zhao. Novel design of actuator fault reconstruction. *International Journal of Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 80:44–50, 2008.