

Fault-tolerant supplementary control synthesis for DC motor with variable load [★]

J. L. González Martínez ^{*} E. Alcorta García ^{**}

^{*} *Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (e-mail: jgonzalezme@uanl.edu.mx).*

^{**} *Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (e-mail: efrain.alcortagr@uanl.edu.mx).*

Abstract: The development of fault tolerant control systems is the subject of this paper. By using supplementary control it is possible to increase the fault-tolerant capability of a control system. The supplementary control has the advantage of not modifying the nominal control, because the control action that is added to compensate the effect of faults on the system is implemented by an additional control loop. The nominal control loop remains as an inner loop and the new control loop as an outer loop of a cascade control. The main advantages of the proposal are that fault tolerance is achieved without modifying the nominal control, the correction to the effect of faults is done automatically and it is possible to improve the behavior of the system. Simulation results confirm the described results.

Keywords: Fault Tolerant control, Cascade control, DC Motor, Internal Model Principle, Inverse system.

1. INTRODUCCIÓN

Una propiedad importante de los lazos de control es la capacidad para compensar el efecto de desviaciones en el valor de los parámetros, es decir, la capacidad para tolerar fallas, Leal Leal and Alcorta Garcia (2020). Muchas veces estas características se consideran desde una perspectiva de robustez. Sin embargo, hay un compromiso entre robustez y desempeño. Desperfectos o fallas en lazos de control deben de considerarse como algo que requiere ser reparado o corregido. De tal forma que no solo es importante lograr mantener la operación del proceso con fallas, evitando con esto que aparezcan paros no programados, sino que se requiere el lograr detectar y localizar las fallas en el sistema.

Diversos esfuerzos por hacer que el lazo de control pueda responder adecuadamente al efecto de fallas incluyen: leyes de control adaptables, con controladores robustos, reconfigurando el control, etc. Sin embargo, la mayor parte de los esfuerzos por realizar tolerancia a fallas modifican el lazo de control nominal. Otro aspecto es el requerimiento explícito de conocer el tamaño de la falla para poder compensar su efecto, ver por ejemplo Blanke et al. (2016), o utilizando algunas técnicas no lineales Patan (2019), Shen et al. (2017) o bien herramientas de la estadística Ding (2020).

En la última década se propuso un esquema de tolerancia a fallas denominado enfoque cascada, ver Rodriguez-

Alfaro et al. (2013), Acosta-Santana et al. (2013), al control tolerante a fallas. Mediante este esquema se mantiene el control nominal y no se requiere conocer explícitamente el tamaño de la falla. El efecto de perturbaciones es también corregido. Este es el esquema que se utiliza en el presente trabajo.

Este trabajo tiene la finalidad de proponer una forma distinta de diseñar la ley de control suplementario, cuya principal tarea es la de lograr tolerancia a cierto tipo de fallas en el sistema. El procedimiento considerado está basado en el principio de control con modelo interno. Como consecuencia, se logra incrementar la capacidad del lazo para tolerar fallas de mayor magnitud y de corregir adicionalmente el efecto de las perturbaciones, que para este sistema corresponde, por ejemplo, el cambio de carga. A diferencia de trabajos previos en el tema, no se tienen problemas de factibilidad como en el caso de uso de desigualdades matriciales, o de mantener errores de estado permanente cuando solo utiliza corrección proporcional. El precio a ser pagado es el conocimiento del sistema en lazo cerrado, que es la base para diseñar el control. Las principales ventajas son que la tolerancia a fallas se logra sin modificar al control nominal, la corrección al efecto de fallas se hace de manera automática y es posible mejorar el comportamiento del sistema también respecto al efecto de perturbaciones externas (cambios de carga).

El presente trabajo se completa enseguida mediante un repaso de algunos conceptos que serán utilizados para construir la solución propuesta en la siguiente sección. En

^{*} El primer autor agradece al conacyt por el financiamiento.

la sección 3 se presenta el sistema de control de velocidad con carga variable que es utilizado en este trabajo y el control nominal correspondiente. En la sección 4 se discute la propuesta de solución al problema de tolerancia a fallas planteado. En la sección 5 se muestran resultados de simulación. En la sección 6 se presenta la conclusión.

2. PRELIMINARES

Un aspecto importante en la literatura relacionada con el diagnóstico de fallas es el concepto de falla.

2.1 Fallas

De acuerdo con Verde et al. (2012), una avería o falla consiste en una desviación de una propiedad característica de un sistema con respecto a las condiciones usuales y estándar de operación. El modo de falla es la forma observable de la falla o de la disfunción y describe de manera precisa la manera en la cual el sistema no cumple su función.

Para fines prácticos, una falla se define como el cambio en el valor de un parámetro fuera de un intervalo de funcionamiento aceptable, Isermann (2006). Este intervalo aceptable es específico para cada aplicación. Esto hace que para un dispositivo determinado utilizado en una aplicación 1 se tenga un intervalo y cuando el mismo dispositivo es aplicado a otra tarea (de operación crítica) el intervalo aceptable se reduce con respecto al intervalo previo de la aplicación 1.

2.2 Tolerancia a fallas con enfoque cascada

En general, se puede decir que el control tolerante a fallas se trata de acomodar y/o reconfigurar un controlador para hacerlo operativo y mantener un sistema fiable, a prueba de fallas Ding (2020). A grandes rasgos, un esquema de control tolerante a fallas se implementa en dos pasos:

- Un sistema de diagnóstico de fallas que funciona en tiempo real, sincronizado con la operación del proceso, y activa la acción tolerante a fallas cuando se detecta e identifica una falla.
- El controlador se acomoda o reconfigura en base a la información sobre la falla recibida del sistema de diagnóstico.

En este trabajo se utiliza el denominado enfoque cascada, Rodríguez-Alfaro et al. (2013), Acosta-Santana et al. (2013), el cual propone el uso de un lazo de control adicional con un control suplementario cuya finalidad es la de compensar el efecto de fallas (y/o perturbaciones) presentes en el sistema. El lazo cerrado de control original se convierte, para el nuevo esquema, en la planta y se utiliza la información de la salida nominal (obtenida del funcionamiento sin fallas del sistema) como referencia. Ver la figura 1

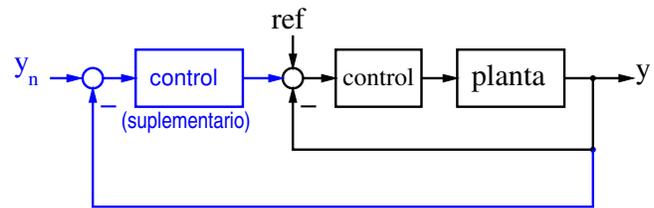


Fig. 1. Esquema de control tolerante a fallas con enfoque cascada

2.3 Principio de modelo interno

El concepto de modelo interno juega un papel crucial en los problemas de los reguladores. El principio del modelo interno puede expresarse intuitivamente como Bengtsson (1977): "Todo buen regulador debe crear un modelo de la estructura dinámica del entorno en el sistema de bucle cerrado".

Una aplicación del principio de modelo interno es el desarrollo del control con modelo interno (IMC por las siglas en inglés), el cual puede representarse como se muestra en la figura 2, Garcia and Morari (1982):

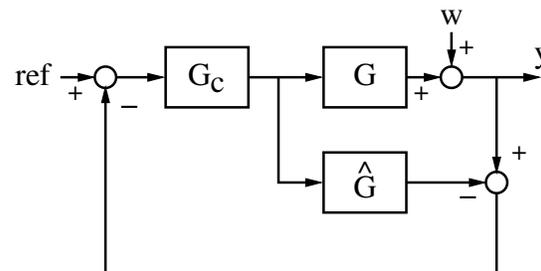


Fig. 2. Esquema de control con modelo interno. W representa perturbaciones

El objetivo de control se alcanza, idealmente, cuando se cumplen las relaciones Garcia and Morari (1982):

$$\hat{G} = G \quad (1)$$

$$G_c = G^{-1} \quad (2)$$

donde G representa a la planta, \hat{G} es un modelo de la planta y G_c es el control.

Note que a pesar de que las ideas del modelo interno tienen un origen en los años 70's del siglo pasado Francis and Wonham (1976), se sigue aplicando novedosamente y con éxito para resolver algunos problemas de control Marconi and Teel (2013).

3. MOTOR DE CD CON CARGA VARIABLE

La planta consta de un motor de corriente continua de imán permanente. La señal de entrada (la corriente del inducido) es proporcionada por un bucle de control de

corriente en cascada. El servoamplificador del controlador de corriente funciona en modo de 4 cuadrantes, de modo que la orientación de la corriente y, en consecuencia, la orientación de la rotación del motor es arbitrariamente ajustable. Los sensores disponibles para la señal de salida (rotación) son un tacogenerador analógico y un codificador incremental digital. El eje libre del motor está acoplado rígidamente a un segundo motor con características idénticas mediante un embrague. Este segundo motor funciona en modo generador. Su corriente de salida es ajustable por otro controlador de corriente. El equipo es comercial y proviene de la empresa AMIRA y corresponde al modelo DR300, una foto del equipo se puede ver en la figura 3.



Fig. 3. Equipo de laboratorio DR-300 de AMIRA

El modelo fue aproximado de mediciones realizadas en la operación. La representación se puede apreciar en la figura 4.

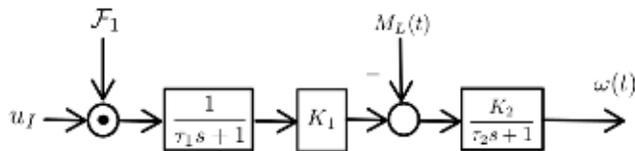


Fig. 4. Modelo en lazo abierto

Donde se tienen los siguientes valores para las constantes del modelo:

Parámetro	Valor	Unidad
τ_1	0.03	s
K_1	1.775	Nm/A
τ_2	0.75	s
K_2	3.38	

Y además se tiene que $M_L(t)$ es la carga variable; la falla está representada con la pérdida de efectividad del actuador y está modelada como un factor menor a uno en producto con la señal que proviene del actuador.

Las ecuaciones en espacio de estados que describen el comportamiento del motor, considerando que la carga no se modela (la carga funciona como una perturbación) esta dado por el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}(t) \\ \dot{I}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.330 & 7.99 \\ 0 & -33.33 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega(t) \\ I(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 33.33 \end{bmatrix} \mathcal{F}_1 \cdot u_I(t)$$

$$+ \begin{bmatrix} 4.506 \\ 0 \end{bmatrix} M_L(t) \quad (3)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} \omega(t) \\ I(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde $\omega(t)$ es la velocidad angular y $I(t)$ es la corriente de armadura del motor. F_1 representa de la falla en el actuador y $u_I(t)$ la señal de control del lazo interno del control nominal. La falla consiste en una pérdida de capacidad del actuador. Los niveles de la falla considerados en este trabajo no corresponden necesariamente a situaciones físicas, pero permite tener una idea de la capacidad del control suplementario considerado.

3.1 Control nominal

Para el control nominal se utiliza una ley de control que permite error cero para referencias constantes, siempre y cuando el par de carga es cero. Valores de par de carga provocan un error en el seguimiento de la salida. Se plantea un control del tipo

$$u(t) = -K \begin{bmatrix} \omega(t) \\ I(t) \end{bmatrix} + g\omega_r(t)$$

Aun y cuando se tiene disponible la corriente y la velocidad angular del motor, para diseñar el control (para el seguimiento) solo se considera la velocidad $\omega(t)$. La corriente se utiliza para obtener la retroalimentación de estado. Esto debido a que se supone que el valor de la carga es desconocido.

La estructura del control es como un control cascada, con un lazo interno de corriente y uno externo de velocidad. Ver la figura 5

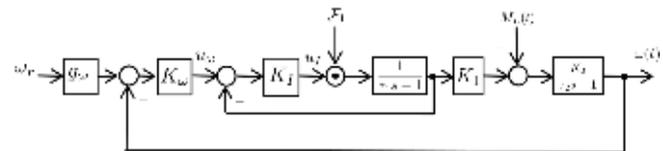


Fig. 5. Modelo en lazo cerrado

es decir,

$$u_I(t) = K_I (u_\omega(t) - I(t)) \quad (5)$$

$$u_\omega(t) = K_\omega (g_\omega \omega_r(t) - \omega(t)) \quad (6)$$

Seleccionando valores propios deseados de lazo cerrado como $\{-18.1, -18.3\}$ para mantener el error de seguimiento en las rampas y en ausencia de carga pequeño (≤ 0.2). Para esto notamos que se requiere una ganancia de retroalimentación

$$K = [1.0668 \ 0.052] \quad (7)$$

De las relaciones de las retroalimentaciones mostradas (5)-(6) y la ganancia requerida (7):

$$K = [1.0668 \ 0.052] = [K_I K_\omega \ K_I] \quad (8)$$

Por lo que:

$$K_I = 0.052 \quad (9)$$

$$K_\omega = \frac{1.0668}{0.052} = 20.5167 \quad (10)$$

Además se requiere una ganancia g , la cual se aplica a la referencia y que se calcula con:

$$\begin{aligned} g &= [K \ 1] \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= [1.068 \ 0.052 \ 1] \begin{bmatrix} -1.330 & 7.99 & 0 \\ 0 & -33.33 & 33.33 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= 1.24221602 \quad (11) \end{aligned}$$

y para el esquema implementado

$$g = K_I K_\omega g_\omega$$

resulta:

$$g_\omega = 1.1644$$

4. TOLERANCIA A FALLAS

El esquema de control tolerante a fallas con enfoque cascada incluye el uso de un control suplementario. En desarrollos previos se utilizó el diseño de una retroalimentación mediante desigualdades lineales matriciales (LMI's) Acosta-Santana et al. (2013), y para sistemas no lineales control basado en pasividad Rodríguez-Alfaro et al. (2013) o bien utilizando control PI generalizado Leal Leal and Alcorta Garcia (2020).

Se puede demostrar que el enfoque cascada para el control tolerante a fallas y el control con modelo interno comparten una estructura semejante González Martínez (2021). En vista de esto es posible mostrar como las propiedades del control con modelo interno son compartidas con el enfoque cascada. En vista de esto, el control suplementario admite un diseño inspirado en el control con modelo interno.

4.1 Control suplementario

Para el control suplementario (CS), inspirados en el control con modelo interno, se propone usar una aproximación a la inversa del sistema en lazo cerrado (sin considerar la carga y la falla). Esto nos resulta en el siguiente control dinámico:

$$\begin{aligned} A_c &= \begin{bmatrix} -2041.67 & 1000 \\ 1000 & 5.68 \times 10^{-14} \end{bmatrix}; \quad B_c = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ C_c &= [-6306.822 \ 3144.087]; \quad D_c = [3145.128] \end{aligned}$$

5. RESULTADOS

Con la finalidad de mostrar las bondades del esquema propuesto se consideran una serie de escenarios que consideran diferentes niveles de falla con y sin reconfiguración.

5.1 Casos

Los diferentes casos de estudio se presentan en la tabla siguiente:

Casos estudiados	
Caso	Descripción
1	sin CS, $M_L(t) = 0.2$, sin falla
2	sin CS, $M_L(t) = 0.2 * \text{sen}(0.5t)$, sin falla
3	sin CS, $M_L(t) = 0.2$, falla 15%
4	sin CS, $M_L(t) = 0.2$, falla 30%
5	sin CS, $M_L(t) = 0.2$, falla 50%
6	con CS, $M_L(t) = 0.2$, sin falla
7	con CS, $M_L(t) = 0.2 * \text{sen}(0.5t)$, sin falla
8	con CS, $M_L(t) = 0.2$, falla 15%
9	con CS, $M_L(t) = 0.2$, falla 30%
10	con CS, $M_L(t) = 0.2$, falla 50%

Se utiliza la señal de referencia mostrada en la figura 6.

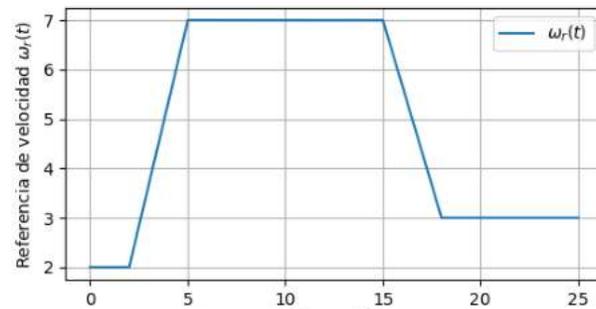


Fig. 6. Trayectoria de referencia para el sistema

La evolución del error de velocidad cuando la carga es $M_L(t) = 0.2$ se puede ver en la figura 7.

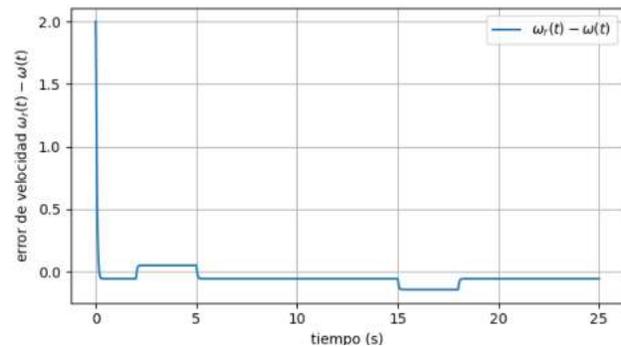


Fig. 7. Trayectoria del error para el sistema sin control suplementario con carga $M_L(t) = 0.2$, (Caso 1)

La trayectoria del error de velocidad cuando la carga es $M_L(t) = 0.2 \text{sen}(0.1t)$ se encuentra en la figura 8

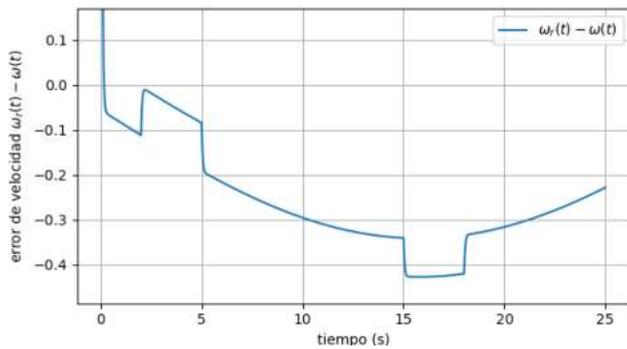


Fig. 8. Trayectoria del error para el sistema sin control suplementario con carga $M_L(t) = 0.2\text{sen}(0.1t)$

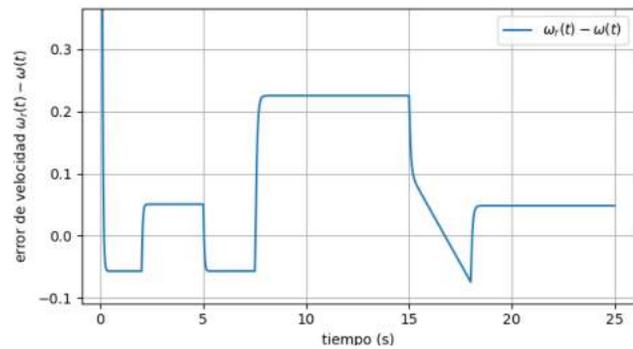


Fig. 11. Trayectoria del error para el sistema sin control suplementario con carga $M_L(t) = 0.2$ y una falla del 50% a partir de $t = 7.5s$

Para los casos 6 al 10 se utiliza la misma situación respecto a la carga y solo cambia el hecho de que se utiliza el control suplementario, es decir, se utiliza el lazo de control tolerante (enfoque cascada).

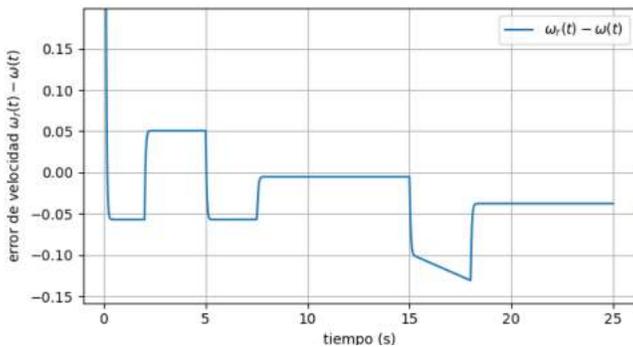


Fig. 9. Trayectoria del error para el sistema sin control suplementario con carga $M_L(t) = 0.2$ y una falla del 15% a partir de $t = 7.5s$

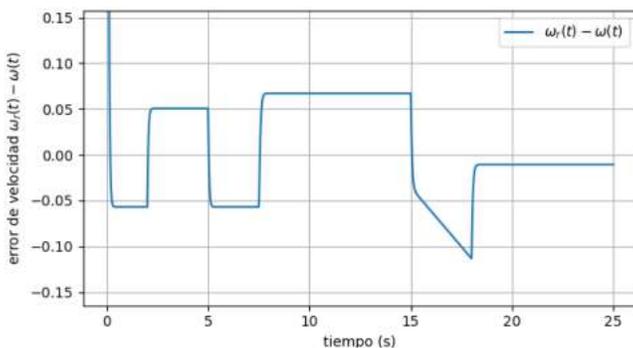


Fig. 10. Trayectoria del error para el sistema sin control suplementario con carga $M_L(t) = 0.2$ y una falla del 30% a partir de $t = 7.5s$

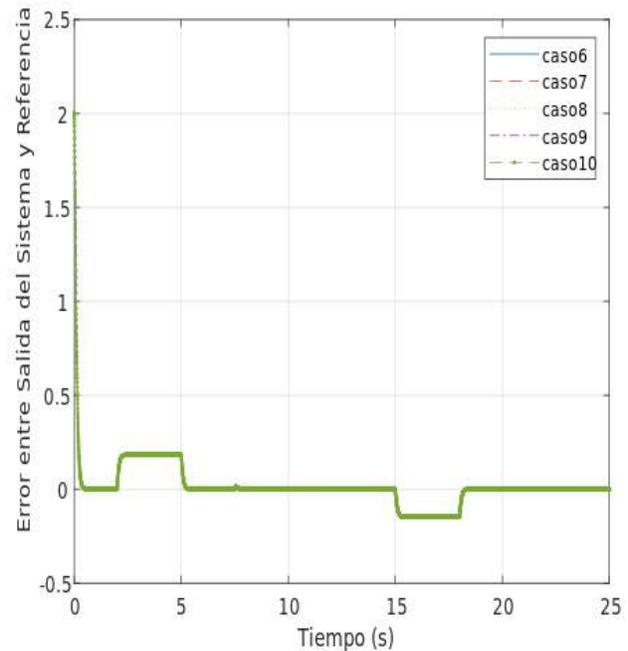


Fig. 12. Trayectoria del error para el sistema con control suplementario en los casos 6, 7, 8, 9 y 10.

Se puede observar en la figura 12 que el efecto del control suplementario es tal que reduce significativamente el efecto de la carga $M_L(t)$ cuando es constante o bien cuando es variante en el tiempo. El efecto de la falla también se reduce significativamente. En mayor detalle del efecto remanente se puede apreciar en la figura 13.

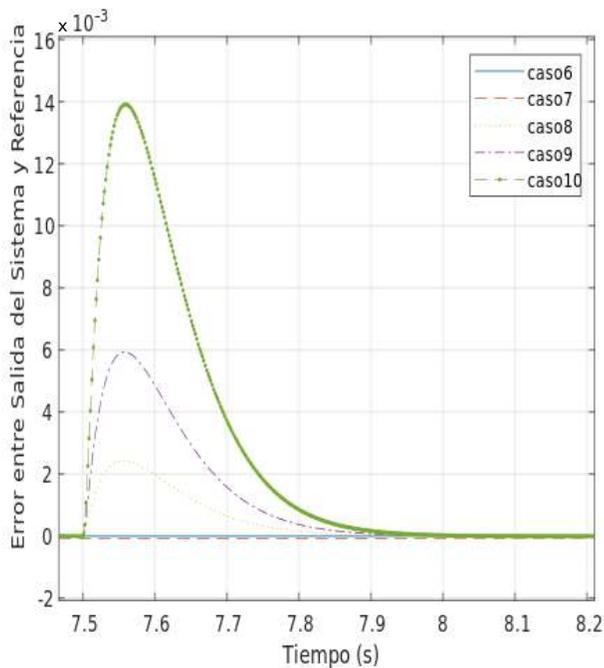


Fig. 13. Amplificación de la trayectoria del error para el sistema con control suplementario correspondiente a los casos 6, 7, 8, 9 y 10.

5.2 Discusión

El sistema de control de velocidad con carga variable cuenta con un control nominal que se ve afectado por el cambio de carga. Sin embargo, en ausencia de carga, el control alcanza error cero para intervalos de la referencia constantes. Un error en el seguimiento se manifiesta en la parte de las trayectorias donde hay una pendiente. Esto representa el problema a ser abordado. En el primer conjunto de gráficas, figuras 7-11 se observa el efecto de la carga, los errores de seguimiento debidos a las pendientes en la referencia así como el efecto de las fallas. En las figuras 7 y 8. Adicional al efecto de la carga y carga variable se presenta el efecto de fallas de diferente magnitudes en las figuras de la 9 a la 11. El efecto de la corrección mediante el control suplementario impacta sobre todos los efectos debido a la carga y/o a las fallas, como se observa en la figura 12. Note que los únicos errores que prevalecen al control suplementario corresponden a los errores del seguimiento (que se tienen desde el principio).

El efecto del lazo de control suplementario es presentado en la figura 12. Claramente el efecto de la carga y las fallas es reducido significativamente, lo cual es el principal objetivo de la tolerancia a fallas.

6. CONCLUSIÓN

El enfoque cascada para el control tolerante a fallas fue reconsiderado utilizando el principio de control con modelo interno para apoyar el diseño de la compensación. El uso de las ideas del control con modelo interno permite garantizar un buen manejo del efecto de las fallas así como simplificar el diseño del control suplementario. El esquema propuesto aumenta el tamaño de las fallas que se pueden ser toleradas por el sistema, es decir, se incrementa la capacidad de tolerar fallas de un sistema. El precio a pagar es el conocimiento del modelo del sistema retroalimentado, el cual es el insumo requerido. El procedimiento usado permite también hacer frente a perturbaciones, las cuales son manejadas de forma automática. La implementación para el equipo de laboratorio DR300 esta en proceso.

REFERENCES

- Acosta-Santana, P., Rodríguez-Alfaro, L.H., and Alcorta-García, E. (2013). A cascade structure approach to controller configuration. In *Proc. 2nd Int. Conf. On Control and Fault-Tolerant Systems SysTol'13*.
- Bengtsson, G. (1977). Output regulation and internal models, a frequency domain approach. *Automatica*, 13, 333–345.
- Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., and Staroswiecki, M. (2016). *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer.
- Ding, S.X. (2020). *Advanced methods for fault diagnosis and fault-tolerant control*. Springer.
- Francis, B.A. and Wonham, W.M. (1976). The internal model principle of control theory. *Automatica*, 12, 457–465.
- García, C.E. and Morari, M. (1982). Internal model control. 1. a unifying review and some new results. *Ind. Eng. Chem. Process Des.Dev.*, 21, 308–323.
- González Martínez, J.L. (2021). Relación entre el control con modelo interno y el enfoque cascada para la tolerancia a fallas. Technical report, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
- Isermann, R. (2006). *Fault-diagnosis systems: An introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer, 1 edition.
- Leal Leal, I.E. and Alcorta García, E. (2020). Increased fault tolerance through generalized pi control. In *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático*.
- Marconi, L. and Teel, R.A. (2013). Internal model principle for linear systems with periodic state jumps. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 58(11), 2788.
- Patan, K. (2019). *Robust and Fault-Tolerant Control: Neural-Network-Based Solutions*. Springer.
- Rodríguez-Alfaro, L., Alcorta-García, E., and Espinosa-Pérez, G. (2013). Un enfoque cascada para control activo tolerante a fallas en msp. *Congreso Nacional de Control Automático*.
- Shen, Q., Jiang, B., and Shi, P. (2017). *Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Based on Adaptive Control Approach*. Springer.
- Verde, C., Gentil, S., and Morales-Menendez, R. (2012). *Monitoreo y diagnóstico automático de fallas en sistemas dinámicos*. Trillas.