

Increased fault tolerance through generalized PI control ^{*}

I. E. Leal Leal ^{*} E. Alcorta Garcia ^{*}

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

Abstract. Closed-loop systems, due to their robustness, have a certain level of fault tolerance. This paper proposes a procedure, for non-linear systems with Euler-Lagrange (EL) structure, which allows to increase the fault size that can be tolerated by closed-loop systems. The result uses a cascade scheme to compensate the effect of the faults, as an external control a generalized proportional integral (PI) controller was selected, which has an observer who jointly estimates faults, perturbations and uncertain terms and then cancels their effect in the control stage. The main advantages of the proposed method are that it allows the nominal control to be preserved without alterations and that it requires a minimum of information about the system and the closed loop, making it easy to implement. It is shown by means of a simulation example, a pendulum, the effectiveness of the proposed method.

Keywords: cascade scheme, generalized PI controller, fault tolerance, non-linear system, observer.

1. INTRODUCCIÓN

El requerimiento de fiabilidad en los procesos industriales exige, cada vez más, que los algoritmos de control utilizados puedan lidiar con fallas en sus componentes, sensores y actuadores. Como respuesta, en la literatura de control, se tiene una gran variedad de esquemas propuestos, como puede ser apreciado en Blanke et al. (2006b), Benosman (2011) así como en los libros Blanke et al. (2006a); Isermann (2006); Noura et al. (2009); Alwi et al. (2011); Ding (2014). El Control Tolerante a Fallas (FTC) generalmente se realiza en dos modalidades: pasivo y activo. El enfoque pasivo consiste en incluir en el diseño del control la compensación de posibles fallas, es decir, utiliza las propiedades de robustez que tienen los sistemas en lazo cerrado, para hacer frente a perturbaciones o cambios en la dinámica del sistema, para compensar el efecto de las fallas. La segunda modalidad es llamada activa y consiste en utilizar un mecanismo de diagnóstico de fallas, que obtiene información de la falla, para activar un mecanismo de reconfiguración que modifica el control nominal una vez que la falla se presenta en el sistema. El enfoque activo, al contar con mecanismos de diagnóstico y reconfiguración, requiere de un mayor esfuerzo para su implementación en tiempo real, esto se debe a que necesita modificar el control nominal para realizar la compensación de las fallas.

Una de las líneas de desarrollo del FTC es la que busca restablecer el comportamiento nominal del sistema (tanto como sea posible) una vez que una falla admisible se presenta. Es oportuno aclarar que no todas las fallas pueden ser compensadas mediante este enfoque, por eso nos restringimos a las que si pueden ser compensadas y a este conjunto se le denomina conjunto de fallas admisibles. Uno de los principales conceptos para el FTC son el concepto de seguimiento de trayectoria, Staroswiecki and Cazaurang (2008). Un problema con ese enfoque es que la trayectoria nominal tiene que ser conocida de antemano. Alternativamente en Lunze and Steffen (2006) se introduce el concepto de actuador virtual, con el cual se realiza un desacople del elemento con falla para lograr la tolerancia. Solo fallas que inhabilitaban a los actuadores se consideraron y se requiere contar con suficientes actuadores para poder lograr la tolerancia a fallas. Ambos enfoques, requieren modificar el control nominal para poder lograr la tolerancia a fallas. Con esto en mente en Alfaro et al. (2012) se propone un esquema novedoso para la compensación del efecto de las fallas, utilizando un lazo de control adicional y un nuevo controlador. Por un lado el control nominal queda sin alteración después de hacer la reconfiguración y por otro, cuando el sistema bajo estudio satisface la representación Hamiltoniana, la ley de control para la reconfiguración es relativamente sencilla. Sin embargo, el enfoque de Alfaro et al. (2012) requiere de conocimiento del modelo y control nominal para el diseño.

^{*} La primera autora agradece el apoyo de CONACYT y los autores agradecen el apoyo mediante el proyecto PAICYT-UANL-763.

Los observadores PI generalizados incluyen de manera natural y embebida un modelo polinomial en el tiempo que es de actualización automática, de las perturbaciones no lineales dependientes del estado y de las perturbaciones exógenas sin estructura alguna. Estos observadores se caracterizan por su eficiencia ante la presencia de perturbaciones, lo cual representa una importante ventaja cuando se realiza diseño de sistemas de control Sira Ramirez et al. (2018). La principal aplicación del observador PI generalizado es cuando es usado en línea con su controlador (esquema controlador-observador), lo que resulta en un control PI generalizado. Existe un resultado en Arteaga Pérez and Gutiérrez Giles (2014) que utiliza un control PI generalizado y que tiene la ventaja de no requerir conocimiento del modelo matemático, cuando se aplica a sistemas EL. También existe un resultado en Bonivento et al. (2004) en donde las fallas que afectan al sistema pueden modelarse como funciones dependientes del tiempo y diseña un controlador que incorpora un modelo interno de esta familia y que compensa la presencia de cualquier falla. Ambos resultado se tomaron como base para realizar un FTC libre de modelo.

En este trabajo se propone un enfoque de FTC para compensar fallas aditivas y multiplicativas (en componentes, sensores, y actuadores). El enfoque propuesto, para su implementación combina las ventajas de las dos modalidades pasivo (presente en todo momento) y activo (agregado como un control externo de reconfiguración). Además, no requiere conocimiento explícito del modelo del sistema (es libre de modelo, en ese sentido). Sin embargo, para su diseño se requiere que el sistema en cuestión pueda modelarse mediante el formalismo de Euler-Lagrange, ver Arteaga Pérez and Gutiérrez Giles (2014). Para lograr el incremento de tolerancia a fallas se propone un nuevo lazo de control retroalimentando mediciones de posición y haciendo la diferencia con la posición nominal. Como control externo se utiliza un controlador PI generalizado. La “planta” para este nuevo lazo corresponde al sistema original en lazo cerrado. Note que un esquema cascada no modifica el control nominal del sistema, esto es una ventaja ya que no se requiere conocer la ley de control nominal y además no todos los sistemas nos permiten modificarla. Por lo que puede llegar a ser de gran utilidad en la implementación.

El trabajo se ha organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presentan los preliminares. En la sección 3 se presenta y justifica el enfoque propuesto. En la sección 4 se presenta una simulación en un péndulo descrito en Sira Ramirez et al. (2010). Las conclusiones finalizan el trabajo.

2. PRELIMINARIES

2.1 Propiedades de los Sistemas Euler-Lagrange

Considere sistemas cuya dinámica está dada por:

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + D\dot{q} + g(q) = \tau \quad (1)$$

donde $q \in \mathbb{R}^n$ es el vector de coordenadas generalizadas, $H(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de inercia, definida positiva, $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de fuerzas centrífugas y de Coriolis, $D \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz diagonal semidefinida positiva que contiene los coeficientes de fricción viscosa, $g(q) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de torques debidos a la gravedad y $\tau \in \mathbb{R}^n$ es el vector de los torques que actúan en las articulaciones.

El modelo del sistema en representación EL (1), tiene las siguientes propiedades:

Propiedad 1: $H(q)$ es una matriz simétrica definida positiva y satisface

$$\lambda_{\min}(H(q))\|x\|^2 \leq x^T H(q)x \leq \lambda_{\max}(H(q))\|x\|^2 \quad \forall q, x \in \mathbb{R}^n$$

Propiedad 2: Si se calcula $C(q, \dot{q})$ utilizando los símbolos de Christoffel de primer tipo, se cumple que la matriz $\dot{H}(q) - 2C(q, \dot{q})$ es antisimétrica, es decir,

$$x^T (\dot{H}(q) - 2C(q, \dot{q}))x = 0 \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$$

Propiedad 3: El sistema (1) es pasivo $\Sigma : \tau \rightarrow \dot{q}$, Energía entregada al sistema

$$\langle \dot{q}, \tau \rangle = \int_0^t \dot{q}^T(s)\tau(s)ds \geq -V(q(0), \dot{q}(0)) \quad (2)$$

Energía total del sistema

$$V(q, \dot{q}) = \frac{1}{2}\dot{q}^T H(q)\dot{q} + P(q) \quad (3)$$

donde $P(q)$ es la energía potencial.

2.2 Esquema cascada

Un esquema cascada cuenta con la ventaja de respetar por completo al control nominal además de ser fácil de implementar. Este esquema propone hacer un cambio en la referencia del sistema nominal en lazo cerrado, para este cambio se suma a la referencia nominal la acción del FTC. Con este cambio de referencia interno se elimina el efecto de la falla. En la figura 1 se presenta el esquema cascada.

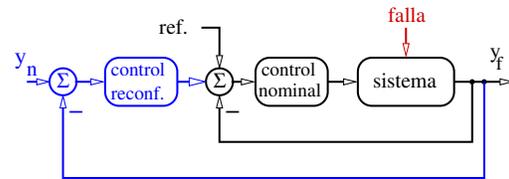


Figura 1. Esquema cascada

donde y_n es la salida nominal y y_f es la salida con falla.

2.3 Control PI generalizado

El diseño estándar de controladores basados en observadores GPI requiere conocer la matriz de ganancia del sistema (matriz de inercia, para los sistemas en representación EL), Sira Ramirez et al. (2010). Esto se debe a que el diseño del controlador está basado en la linealización por

retroalimentación aplicada directamente al modelo. Para hacer innecesario el conocimiento de la matriz de inercia existe un paradigma alternativo en Arteaga Pérez and Gutiérrez Giles (2014), donde se utilizan las propiedades de energía del modelo dinámico del robot, empleando el llamado algoritmo *Slotine-Li*, propuesto por Slotine and Li (1987). Para aplicar dicho algoritmo considérese las variables definidas como

$$\dot{q}_r = \dot{q}_d - \Lambda e \quad (4)$$

$$s = \dot{q} - \dot{q}_r = \dot{e} + \Lambda e \quad (5)$$

donde $\Lambda \in \mathbb{R}^n$ es una matriz diagonal definida positiva, q_d es el vector que contiene la posición deseada, $e = q - q_d$ es el error de seguimiento. Primero para evitar la linealización consideremos disponibles el modelo del sistema y la medición de velocidad. La ley de control nominal es:

$$\tau = H(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q})\dot{q}_r + D\dot{q}_r + g(q) - K_v s \quad (6)$$

donde $K_v \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es una matriz diagonal definida positiva. En lazo cerrado tenemos

$$H(q)\dot{s} + C(q, \dot{q})s + K_{Dv}s = \Psi \quad (7)$$

donde $K_{Dv} = D + K_v$ y

$$\Psi = \tau - (H(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q})\dot{q}_r + D\dot{q}_r + g(q)) + K_v s \quad (8)$$

define un mapeo pasivo $\Sigma : \Psi \rightarrow s$ con función de almacenamiento

$$V(q, s) = \frac{1}{2}s^T H(q)s \quad (9)$$

Entonces el sistema puede ser estabilizado en $s = 0$, y por lo tanto $(e, \dot{e}) \rightarrow (0, 0)$ logrando el objetivo de control. Aplicando la técnica de control PI generalizado se tiene que

$$\ddot{e} = -\Lambda \dot{e} + H^{-1}(q)(\tau - C(q, \dot{q})s) + z \quad (10)$$

comó es usual en el diseño de algoritmos de control PI generalizado, se propone un modelo interno para el término desconocido z .

Suponemos ahora que $H(q)$ es desconocida. Sin embargo, cómo es necesario un valor nominal para la implementación, se tiene que

$$H(q) = I \implies C(q, \dot{q})s = 0$$

La última relación es válida ya que $C(q, \dot{q})$ se calcula utilizando los símbolos de Christoffels, Siciliano et al. (2010). La dinámica del error está dada por:

$$\dot{e}_1 = e_2 \quad (11)$$

$$\dot{e}_2 = H^{-1}(q)(\tau - C(q, \dot{q})s - \Lambda \dot{e} + H^{-1}(q)w)$$

donde $e_1 \triangleq e$ y la ley de control es:

$$\tau = -K_v(\dot{e} + \Lambda e) - \dot{z} = -K_v s + K_v \dot{e} - \dot{z} \quad (12)$$

En lazo cerrado con la ecuación (10), se obtiene

$$H(q)\dot{s} + C(q, \dot{q})s + K_v s = K_v \dot{e} - \dot{z} \quad (13)$$

Esta última ecuación pone de manifiesto que \hat{w} intenta compensar $H(q)z$ en lugar de z solo. Por esta razón es más conveniente definir

$$w(t) \triangleq H(q)z \implies z = H^{-1}(q)w \quad (14)$$

El término w puede ser localmente modelado como un vector de polinomios de Taylor dependientes del tiempo, de grado $p - 1$, más un término residual

$$w(t) = \sum_{i=0}^{p-1} a_i t^i + r(t) \quad (15)$$

Esquema Controlador-Observador.

$$\tau = -K_v(\dot{e} + \Lambda e) - \hat{w} = -K_v s + K_v \dot{e} - \hat{w} \quad (16)$$

$$\dot{\hat{e}}_1 = \hat{e}_2 - \Lambda \hat{e} + (\lambda_{p+1} - \Lambda)\tilde{e}$$

$$\dot{\hat{e}}_2 = \lambda_p \tilde{e}$$

$$\dot{\hat{w}}_1 = \hat{w}_2 + \lambda_{p-1} \tilde{e}$$

$$\vdots$$

$$\dot{\hat{w}}_{p-1} = \hat{w}_p + \lambda_1 \tilde{e}$$

$$\dot{\hat{w}}_p = \lambda_0 \tilde{e}$$

donde $\hat{w} = \hat{w}_1$, $\hat{e} = \hat{e}_2$ y $\tilde{e} = e - \hat{e}_1$. Las ganancias del observador $\{\lambda_0, \dots, \lambda_{p+n-1}\}$ son elegidas de forma que el siguiente polinomio sea Hurwitz.

$$p_{obs}(s) = s^{n+p}I + \lambda_{n+p-1}s^{n+p-1} + \dots + \lambda_1 s + \lambda_0 \quad (17)$$

La garantía de funcionamiento del esquema utilizado aquí puede ser revisada en Sira Ramírez et al. (2010) así como en Arteaga and Gutiérrez (2014).

3. ESQUEMA DE TOLERANCIA A FALLAS PROPUESTO

El enfoque propuesto permite compensar el efecto de las fallas, su característica principal es que su diseño es libre de modelo, lo cual puede llegar a ser de gran utilidad cuando se quiera trabajar con sistemas complejos.

3.1 Control Tolerante a Fallas Libre de Modelo

El objetivo del FTC es reducir el error entre la trayectoria del sistema con falla y la trayectoria del sistema nominal. Mediante un cambio de referencia interno se elimina el efecto de la falla y se busca que el desempeño del sistema con falla sea muy cercano al desempeño del sistema nominal, esto siempre y cuando lo permitan las condiciones físicas del sistema con falla. Con la finalidad de garantizar un funcionamiento aceptable del sistema bajo condiciones de falla se desarrolla un enfoque de FTC que utiliza las mediciones en tiempo real para compensar el efecto de las fallas, el cual cuenta con las siguientes características:

- No requiere conocer explícitamente el modelo matemático del sistema.
- El esquema cascada permite respetar por completo al control nominal.
- Solo utiliza mediciones de posición.

El esquema de FTC propuesto utiliza un control PI generalizado, como se muestra en la figura 2.

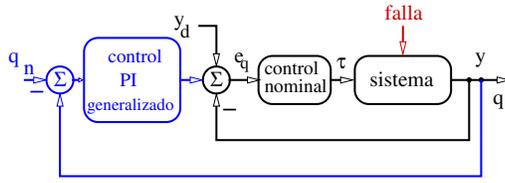


Figura 2. Esquema cascada para el FTC

donde y_d es la salida deseada y q_n es la posición nominal. Se tienen los errores $e = q - q_n$ y $e_q = \tau_{FTC} + y_d - y$.

Consideramos las siguientes definiciones:

Definición. 1: (Tolerancia a las fallas) Dada un sistema Euler-Lagrange en lazo cerrado y una falla $f_i(t)$. Este sistema se denomina tolerante a la falla si en presencia de esta falla se satisface lo siguiente: 1) El sistema de retroalimentación de Euler-Lagrange permanece estable. 2) La salida del sistema permanece dentro de un margen de tolerancia admisible con respecto a la salida nominal. 3) La ley de control nominal $\tau(t)$ se mantiene limitada y físicamente realizable. \square

Definición. 2: (falla recuperable) Una falla $f_i(t)$ que hace que el sistema nominal (lazo cerrado) no sea tolerante a fallas, se denomina recuperable si existe un esfuerzo de control suplementario ($\tau_{FTC}(t)$) que cuando se aplica en forma de un nuevo lazo de control, el lazo cerrado resultante es tolerante a fallas con respecto a la falla considerada.

Esquema Controlador-Observador

$$\begin{aligned} \tau_{FTC} &= -K_v(\dot{e} + \Lambda e) - \hat{w} = -K_v s + K_v \dot{e} - \hat{w} \quad (18) \\ \dot{\hat{e}}_1 &= \hat{e}_2 - \Lambda \hat{e} + (\lambda_{p+1} - \Lambda) \tilde{e} \\ \dot{\hat{e}}_2 &= \lambda_p \tilde{e} \\ \dot{\hat{w}}_1 &= \hat{w}_2 + \lambda_{p-1} \tilde{e} \\ &\vdots \\ \dot{\hat{w}}_{p-1} &= \hat{w}_p + \lambda_1 \tilde{e} \\ \dot{\hat{w}}_p &= \lambda_0 \tilde{e} \end{aligned}$$

donde $\hat{w} = \hat{w}_1$, $\hat{e} = \hat{e}_2$ y $\tilde{e} = e - \hat{e}_1$.

El esquema controlador-observador de la ecuación (17) es un control nominal que estima perturbaciones y términos inciertos, al ser utilizado como control externo, ver figura 2, se convierte en FTC por lo que también va a estimar fallas, es decir, el esquema controlador-observador de la ecuación (19) es robusto a perturbaciones y tolerante a fallas. Criterios para la evaluación del controlador:

- Se aplica a sistemas con estructura Euler-Lagrange.
- Entrada de control acotada.
- Acción de control dentro de los límites permitidos.
- Fijar un error máximo antes de paro.
- Al ocurrir la falla el error presenta un pequeño transitorio el cual se desprecia.

3.2 Análisis de estabilidad en presencia de fallas

Para el análisis de estabilidad se evocarán los resultados de Sira Ramírez et al. (2010) y de . En este punto, por simplicidad, el control nominal de los sistemas está restringido a tener una estructura de Euler-Lagrange, por lo que el sistema de retroalimentación nominal resulta también en un sistema de bucle cerrado de Euler-Lagrange, ver Ortega et al. (1998). En este caso, si las fallas son absolutamente uniformes, entonces la estabilidad de todo el esquema está garantizada por los resultados dados en Arteaga and Gutiérrez (2014).

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

El enfoque propuesto para el FTC es aplicado en el modelo de un péndulo.

4.1 Descripción del Sistema

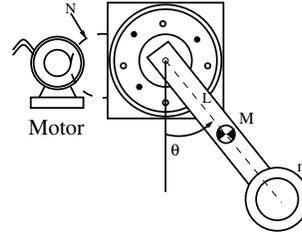


Figura 3. Esquema del péndulo

donde M es la masa de la barra, m es una masa extra, L es la longitud de la barra, θ es el desplazamiento angular, N es la relación de transmisión, F_e es la magnitud de fricción de Coulomb, J es el momento de inercia, B es el coeficiente de fricción viscosa y g es la gravedad. Los parámetros usados en el modelo son $M = 0.0883 \text{ kg}$, $m = 0.05 \text{ kg}$, $L = 0.24 \text{ m}$, $N = 26$, $J = 0.0079 \text{ kgm}^2$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$.

El péndulo cuenta con un control PD+, el cual es un control de movimiento utilizado en robots, Kelly and Santibáñez (2003), cuya Ley de control viene dada por:

$$\tau = K_p \ddot{q} + K_v \dot{q} + H(q) \ddot{q}_d + C(q, \dot{q}) \dot{q}_d + g(q) \quad (19)$$

Considerando el modelo no lineal del péndulo

$$\underbrace{\left[J + \frac{L^2}{N^2} \left(\frac{M}{3} + m \right) \right]}_H \ddot{\theta} + \underbrace{\frac{1}{N} \left(\frac{M}{2} + m \right) g L \text{Sen}(\theta)}_G \quad (20)$$

La ley de control nominal es

$$\tau = K_p \ddot{q} + K_v \dot{q} + H(q) \ddot{q}_d + G(q) \text{Sen}(q) \quad (21)$$

esta ley de control se utilizó para llevar a cabo la simulación, sin embargo, para su implementación en un sistema físico no se requiere conocer.

4.2 Simulación

Para realizar la simulación se utilizó el programa Scilab. El modelo del péndulo con perturbaciones es:

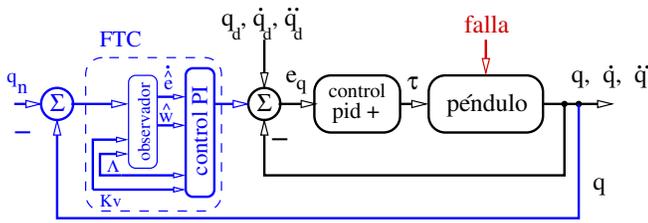


Figura 4. Esquema del FTC propuesto aplicado al péndulo

$$\left[J + \frac{L^2}{N^2} \left(\frac{M}{3} + m \right) \right] \ddot{\theta} + \frac{1}{N} \left(\frac{M}{2} + m \right) g L \text{Sen}(\theta) + B\dot{\theta} + F_c \text{sign}(\dot{\theta}) = \tau \quad (22)$$

El orden del polinomio de términos inciertos se seleccionó como: $p = 3$. Para la implementación del esquema controlador-observador se seleccionaron las siguientes ganancias: $K_v = 0.1$, $\Lambda = 10$, $\lambda_0 = 1$, $\lambda_1 = 2$, $\lambda_2 = 3$, $\lambda_3 = 4$, $\lambda_4 = 5$.

El objetivo de control es seguir la trayectoria deseada (y_n) mostrada en la figura 5, para este ejemplo $y_d = q_n$.

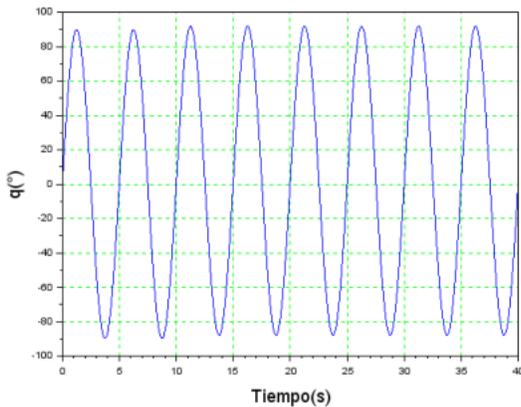


Figura 5. Desplazamiento angular deseado

4.3 Resultados

Con la finalidad de demostrar el incremento a la tolerancia a fallas que permite el esquema de FTC propuesto se analizaron tres casos de simulación. En las tablas 1, 2 y 3 se tienen los resultados numéricos obtenidos, en ellas se muestra el comportamiento del Péndulo con dos tipos de control nominal (C_n), que son, el Control PD+, este control se seleccionó porque es ampliamente utilizado en robótica y el Control PI generalizado, este control se seleccionó para comparar que tan tolerante a fallas es cuando actúa como un control estándar (control nominal) y como un control externo (FTC). Después se comparan con los resultados obtenidos al aplicar el FTC propuesto en el sistema del robot, cuyo control nominal es un control PD+. Suponemos que tenemos las siguientes restricciones: el par máximo que puede ser aplicado es $\tau_{max} = 4.48$ y la aplicación física del

sistema no permiten tener un error de seguimiento mayor a 2° . **Caso 1:** Se consideró el Péndulo en condiciones nominales de operación. se puede observar que cuando

Control	T (Nm)	e (°)
$C_n = PD+$	± 0.06	± 0.03
$C_n = GPI$	± 1.2	± 0.05
$C_n = PD + y FTC = GPI$	± 0.06	± 0.0025

Tabla 1. Sistema nominal (perturbado)

el sistema sólo cuenta con el control nominal PD+ el torque de entrada es $T = 0.06$ y el $e = 0.03$. con el control GPI estándar se necesita mayor energía un torque $T = 1.2$ sin embargo el error sigue siendo bueno. Y con el FTC tenemos resultados similares a este, ya que aún no ocurren fallas. **Caso 2:** Se consideró la presencia de una falla aditiva. se puede ver que con el FTC puede

Control	T (Nm)	e (°)	f1 (Nm)
$C_n = PD+$	-3.5	-2	3.5
$C_n = GPI$	± 1.2	± 0.5	3.7
$C_n = PD + y FTC = GPI$	± 4.48	± 0.0025	4.4

Tabla 2. Sistema con falla en el actuador

tolerar una magnitud de falla mayor que lo que toleran los controles nominales. **Caso 3:** Se consideró la presencia de una falla multiplicativa. se observa que el FTC tiene

Control	T (Nm)	e (°)	f2 (Kg)
$C_n = PD+$	± 4	± 2	27
$C_n = GPI$	± 4.48	± 2	11
$C_n = PD + y FTC = GPI$	± 4.48	± 0.06	49

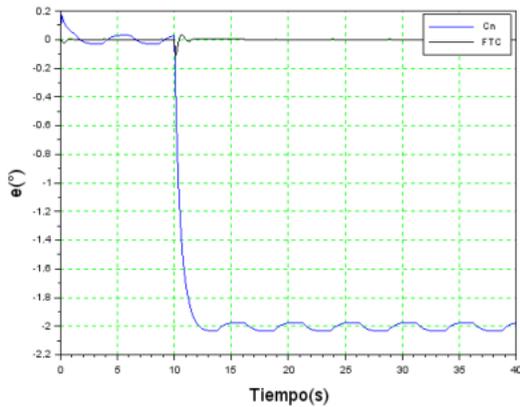
Tabla 3. Sistema con falla debido a un aumento de masa

un error mucho menor y tolera una magnitud de falla mucho mayor. Entonces nuestro objetivo es mantener la trayectoria dentro de un intervalo, mientras se mantenga dentro de esta zona vamos a decir que se está tolerando la falla.

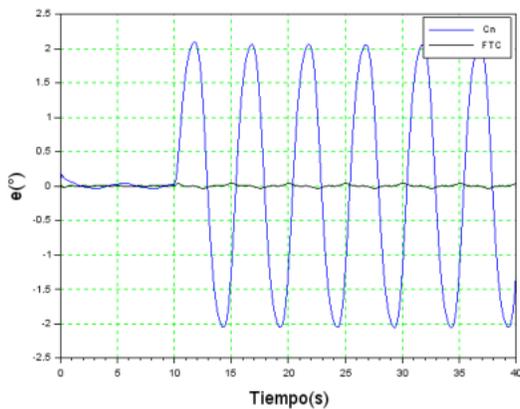
Después con la finalidad de demostrar la utilidad del enfoque propuesto, se supone que ocurre una falla, en $t = 10s$, y se compara el comportamiento del sistema cuando sólo cuenta con su control nominal (Control PD+) y cuando se le agrega en un lazo externo el FTC propuesto. Se considera una magnitud de $|f1| = 3.5$ para la falla aditiva y una magnitud de $|f2| = 27$. Para la falla multiplicativa.

5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se propone un enfoque de FTC para el seguimiento de trayectoria en sistemas Euler-Lagrange. El esquema de FTC propuesto utiliza un lazo de control adicional, conserva el control nominal (del sistema sin falla), y no requiere de modelo explícito. Actualmente, esto representa una ventaja cuando se quiere trabajar con sistemas complejos. El sistema en lazo cerrado posee cierto nivel de tolerancia a fallas (un tamaño de falla



(a) Falla actuador (f1)



(b) Falla debida a un cambio de masa (f2)

Figura 6. Error de posición

tolerable) y este nivel se puede incrementar utilizando el FTC propuesto, el cual está basado en un observador PI generalizado, para estimar las fallas y realizar la compensación. Por lo tanto, se logra desarrollar un esquema de FTC que se puede aplicar a una amplia gama de sistemas no lineales y actuar de manera eficiente y confiable.

REFERENCIAS

- Alfaro, L.H.R., García, E.A., and Castillo, C.P. (2012). Diagnóstico de fallas en sistemas hamiltonianos. *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático 2012*.
- Alwi, H., Edwards, C., and Tan, C.P. (2011). *Fault Detection and Fault Tolerant Control Using Sliding Modes*. Springer.
- Arteaga, M. and Gutiérrez, A. (2014). On the gpi approach with unknown inertia matrix in robot manipulators. *International Journal of Control*, 87(4), 844–860.
- Arteaga Pérez, M.A. and Gutiérrez Giles, A. (2014). On the gpi approach with unknown inertia matrix in robot manipulators. *International Journal of Control*, 87(4), 844–860.
- Benosman, M. (2011). Passive fault tolerant control. *Robust Control Theory Appl.*
- Blanke, M., Kinnaert, M., and Staroswiecki, J.L.M. (2006a). *Diagnosis and fault-tolerant control*. Springer, Berlin Germany, 2nd edition.
- Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., Staroswiecki, M., and Schröder, J. (2006b). *Diagnosis and fault-tolerant control*, volume 2. Springer.
- Bonivento, C., Isidori, A., Marconi, L., and Paoli, A. (2004). Implicit fault-tolerant control: application to induction motors. *Automatica*, 40(3), 355–371.
- Ding, S.X. (2014). *Data-driven Design of Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control Systems*. Advances in Industrial Control. Springer, London.
- Isermann, R. (2006). *Fault-diagnosis systems: An introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer, 1 edition.
- Kelly, R. and Santibáñez, V. (2003). *Control de movimiento de robots manipuladores*. Pearson educación.
- Lunze, J. and Steffen, T. (2006). Control reconfiguration after actuator failures using disturbance decoupling methods. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51(10), 1590–1601.
- Noura, H., Theilliol, D., Ponsart, J.C., and Chamseddine, A. (2009). *Fault-tolerant Control Systems: Design and Practical Applications*. Springer, London.
- Ortega, R., Loria, A., Nicklasson, P.J., and Sira Ramirez, H. (1998). *Passivity based Control of Euler Lagrange Systems: Mechanical, Electrical and Electromechanical Applications*. Springer.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., and Oriolo, G. (2010). *Robotics: modelling, planning and control*. Springer Science & Business Media.
- Sira Ramirez, H., Luviano Juárez, A., and Cortés-Romero, J. (2010). Control lineal robusto de sistemas no lineales diferencialmente planos. *Revista iberoamericana de automática e informática industrial*, 8(1), 14–28.
- Sira Ramirez, H., Luviano-Juárez, A., Ramírez-Neria, M., and Zurita-Bustamante, E.W. (2018). *Active disturbance rejection control of dynamic systems: a flatness based approach*. Butterworth-Heinemann.
- Sira Ramírez, H., Ramírez-Neria, M., and Rodríguez-Angeles, A. (2010). On the linear control of nonlinear mechanical systems. In *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 1999–2004. IEEE.
- Slotine, J.J.E. and Li, W. (1987). On the adaptive control of robot manipulators. *The international journal of robotics research*, 6(3), 49–59.
- Staroswiecki, M. and Cazaurang, F. (2008). Fault recovery by nominal trajectory tracking. In *American Control Conference*, 1070–1075. Seattle, Washington, USA.