

Identificación y control difuso en el diagnóstico de fallas para sistemas una entrada-una salida: aplicado a la dirección de un robot tractor

Raúl Cortes-Gutiérrez^{1,2}, Julio C. Ramos-Fernández^{1,2},
Juan David Padre-Ñonthe¹, Marco A. Márquez-Vera^{1,2},
Filiberto Muñoz-Palacios^{1,2}

¹ Universidad Politécnica de Pachuca,
Posgrado Maestría en Mecatrónica, Zempoala,
México

² Laboratorio Nacional en Vehículos Autónomos y Exoesqueletos,
México

c.g-raul@hotmail.com, jramos@upp.edu.mx, jhonsnail.23blue@hotmail.com,
marquez@upp.edu.mx, mupafi@upp.edu.mx

Resumen. Un problema en los sistemas mecatrónicos que trabajan en ambientes agresivos, por ejemplo la agricultura, es la degradación parcial o total de los dispositivos o sistemas de medición, que cierran los lazos de control. Si esto sucede en la dirección de un robot tractor, y no está establecida de manera electrónica y con algoritmos adecuados la supervisión en la operación del sistema, se pueden causar perjuicios al propio sistema y civiles. En el presente trabajo, se propone una solución técnica y científica, que consiste en el modelado, identificación y control difuso para sistemas no lineales del tipo una entrada-una salida. Se emplea la teoría de submodelos difusos del tipo Takagi-Sugeno (TS), para identificar y sintonizar una ley de control. Se determina el error residual del sistema en tiempo real contra el modelo difuso en lazo cerrado, para detectar las fallas. Se provocan diferentes fallas simulando la degradación del sensor de posición en una dirección del tipo Ackerman de un Robot Tractor (RT) experimental. Los resultados en simulación y del sistema real que se muestran, indican que los sistemas que se describen con la técnica de TS, son una buena opción para resolver este tipo de problemas en el diagnóstico de fallas en la mecatrónica.

Palabras clave: diagnóstico de fallas, identificación y control difuso, robot tractor.

Identification and Fuzzy Control in the Diagnosis of Faults for Systems One Input-One Output: Applied to the Steering of a Tractor Robot

Abstract. A trouble mechatronic systems that work in aggressive environments, for example agriculture, is the partial or total degradation

of measuring devices or systems, which close the control loops. If this happens in the steering of a tractor robot, and it is not established electronically and with adequate algorithms the supervision in the operation of the system, can cause damages to the system itself and civilians. In the present paper, a technical and scientific solution is proposed, which consists of modeling, identification and fuzzy control for non-linear systems of an input-output type. The theory of fuzzy submodels of the Takagi-Sugeno (TS) type is used to identify and tune a control law. The residual error of the system in real time is determined against the fuzzy model in closed loop, to detect the faults. Different faults are caused by simulating the degradation of the position sensor in a steering of the Ackerman type of an experimental Robot Tractor (RT). The simulation and real system results show that the systems described with the TS technique are a good option to solve this type of problem in the diagnosis of faults in mechatronics.

Palabras clave: fault diagnosis, identification and fuzzy control, robot tractor.

1. Introducción

En la actualidad existen dispositivos y sistemas que por su complejidad demandan un alto grado de confiabilidad en sistemas de seguridad para detección y aislamiento de fallas, cuando algún sistema opera en condiciones de fallo las consecuencias provocadas pueden poner en riesgo la integridad del sistema, daños a los operarios, pérdidas económicas.

Los sistemas de detección de fallas han evolucionado adaptando las técnicas de control disponibles, la teoría de control clásico ha sido empleada en la detección y aislamiento de fallas como se muestra en [1], en dichas técnicas se concentran incertidumbres debido a dinámicas y parámetros no contemplados al modelar un sistema, esta es una limitación general al usar técnicas de control clásico, además las técnicas basadas en el control clásico, no permiten hacer clasificación de un conjunto de fallas, otra desventaja de este método es que si una falla no se modela específicamente no hay garantía que el sistema pueda detectarlo, es por eso que una buena opción es el uso de técnicas basadas en modelos que utilizan la informática industrial y la Inteligencia Artificial.

Como se evidencia en [2], las redes neuronales y la lógica difusa que permiten realizar clasificación y reconocimiento de patrones en los diferentes modos de operación, han sido ampliamente utilizadas en el desarrollo de sistemas de detección y diagnóstico de fallas, debido a sus habilidades de aprendizaje, puesto que se tratan de aproximadores universales como se muestra en [3]. El uso de técnicas de inteligencia artificial para abordar la detección y aislamiento de fallas constituye en la actualidad un campo activo de investigación.

En [4] se presentan trabajos que emplean arquitecturas de modelos basados en formulaciones diferenciales y analíticos, y técnicas de control difuso, considerando las alternativas planteadas para la detección y diagnóstico de fallas.

Existen algunas características deseables como lo son: la rapidez de adaptación ante cambios en las salidas del sistema, la capacidad de clasificación en distintas fallas, las cuales es posible comparar el desempeño de las estrategias como se detallan en [5]. Una arquitectura conocida para el diagnóstico y detección de fallas que se emplea en el presente trabajo de investigación se muestra en la Figura 1.

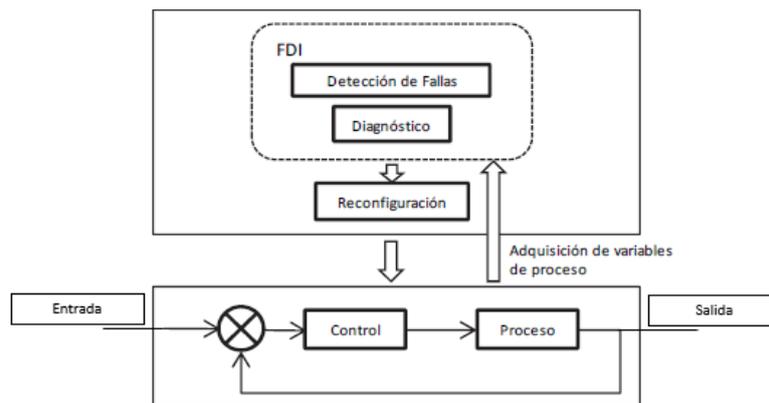


Fig. 1. Esquema de detección y diagnóstico de fallas.

El esquema presentado en la Figura. 1 se compone de dos bloques principales:

- La parte inferior representa el control en lazo cerrado del proceso.
- El bloque superior es el sistema de detección y diagnóstico de fallas, dicho bloque se observa como se obtiene una adquisición de variables de proceso, las cuales son comparadas dentro del sistema de detección de fallas, para así reconfigurar la variable de salida del control en caso de existir algún tipo de falla.

Las técnicas de control difuso presentadas en este artículo forman una parte esencial en la etapa de diseño y control del sistema de dirección en el robot tractor, hay dos tipos principales de controladores basados en lógica difusa como se muestra en [7], que se describen a continuación:

a) Mamdani: Utiliza reglas tipo si-entonces (if-else). Una regla de la base de reglas o base de conocimiento tiene dos partes, el antecedente y el consecuente, en un sistema difuso tipo Mamdani tanto el antecedente como el consecuente de las reglas están definidos por expresiones lingüísticas, como se muestra en [6].

b) Takagi-Sugeno: Las reglas de la base de conocimiento de un sistema Takagi-Sugeno son diferentes en su estructura de los consecuentes a las de los sistemas Mamdani, el consecuente de estas reglas ya no es una etiqueta lingüística, es una función analítica en forma lineal o no lineal, por ejemplo la descripción de espacio de estado, como puede observarse en [6].

En [8, 9] se presentan diferentes métodos de control difuso diseñados según el modelo identificado en cada sistema. El diseño de un controlador usando el enfoque basado en reglas articula tres fases de implementación. Estas son: la fase de adquisición de conocimiento o entrenamiento, la fase de desarrollo del modelo y la fase de prueba del modelo. Los modelos difusos T-S representan la dinámica global de sistemas reales no lineales, como se expone en [10-13]. El modelo tipo T-S de un sistema no lineal, generalmente se basa en un conjunto de modelos lineales locales que se fusionan suavemente con la estructura del modelo difuso, un enfoque natural y directo es diseñar un controlador local para cada modelo local del proceso. Esta idea se conoce como compensación distribuida paralela (PDC), que es un aporte teórico fundamental de los científicos Tanaka y Sugeno principalmente, en la teoría de identificación y control difuso, con la prueba de estabilidad donde se emplea la desigualdad cuadrática de Lyapunov para sintonizar un controlador que hace estable al sistema, como se muestra en [14].

Los avances en las capacidades de diseño mecánico, las tecnologías de detección de fallas, la electrónica y los algoritmos de planificación y control han llevado a la posibilidad de realizar operaciones de campo basadas en plataformas robóticas autónomas. Los trabajos de investigación en el campo del desarrollo de un robot tractor, han aportado a la fecha un importante número de técnicas y métodos para el desarrollo y diseño de elementos en sistemas integrales, en [15] se muestra el desarrollo científico y tecnológico de un sistema para el trabajo agrícola, que consiste en 3 RT, que realizan labores agrícolas perfectamente sincronizados con tecnología RTK-GPS, con un error de posicionamiento de 2cm, éste es un trabajo de agricultura de precisión El desarrollo de la autonomía en vehículos autónomos terrestres ha evolucionado en una corriente exponencialmente creciente, en [16] se desarrolló un robot tractor con especificaciones para la agricultura de precisión.

Para resolver el problema de la escasez de mano de obra agrícola debido al envejecimiento ya que según el INEGI la edad promedio de los trabajadores agrícolas es de 41.7 años [17], el campo enfrenta un serio problema de envejecimiento, cerca de 60 por ciento de los trabajadores agrícolas tiene más de 60 años, lo que los mantiene debajo de la línea de bienestar y repercute en la baja productividad e incluso el abandono de la tierra según datos de [18]. Con el estudio del robot tractor que se desarrolla en este trabajo de investigación, se impulsa el desarrollo científico y tecnológico de la agricultura de precisión en México.

Una plataforma de experimentación adecuadamente instrumentada, permite el aprovechamiento de todos los recursos teóricos en el diseño y desarrollo de estrategias de control para los actuadores que forman parte del sistema de estudio, en [19] se presenta el trabajo previo a este estudio donde se muestra la instrumentación y automatización de un RT. Se presenta en [20], el diseño y desarrollo del control de trayectoria para un RT, donde se emplea un regulador autoajutable. Se realiza en [21] un trabajo de investigación que se centra en las características, medidas de rendimiento, tareas y operaciones agrícolas donde

la aplicación de robots en operaciones de la agricultura ha sido ampliamente demostrada.

El sistema de dirección es uno de los componentes con mayor relevancia en el seguimiento de trayectorias y la autonomía de un RT, el sistema de dirección ha sido objeto de estudio para realizar y diseñar estrategias de control a través de distintas técnicas. En [22] se presenta un control para el torque de una dirección asistida para el seguimiento del par para volantes asistidos que se emplean en la industria automotriz.

Elementos externos tales como sensores, actuadores, mecanismos son empleados en los sistemas de dirección, con el fin de realizar un control robusto de dicho sistema. En [23] se desarrolló, construyó y probó un mecanismo intercambiable sobre la dirección de vehículos todoterreno y maquinaria agrícola.

Existe un sistema de dirección en el cual básicamente se realiza el control de un servomotor, en [24] se presenta la composición básica de este sistema de dirección asistida eléctrica que presenta soluciones de diseño razonables de hardware y métodos de corrección de un controlador comercial. Una solución particular que se emplea en la industria de vehículos autónomos todoterreno es utilizar un actuador electrohidráulico (E/H) para implementar el control de la dirección, en [26] se reporta el diseño y la validación de un controlador de dirección electrohidráulica a través de una combinación de identificación del sistema, simulación del modelo y pruebas de campo.

Los resultados de la prueba se usaron para identificar las características no lineales y dinámicas del sistema de dirección electrohidráulico original, el modelo de identificación del sistema se usó para desarrollar un controlador preliminar, que se simuló en Matlab antes de comenzar la prueba de vehículo a gran escala. Un reporte de diagnóstico de fallas en el sistema de dirección se ha documentado en [26], donde se presenta una plataforma experimental a la cual se le aplica una unidad de control para un actuador que acciona el sistema de dirección.

2. Servomecanismo de dirección

En el presente trabajo de investigación se automatizó un tractor Jhon Deere serie D100, la dirección del RT funciona mediante un sistema de piñón y cremallera, el sistema de dirección de piñón y cremallera de alta resistencia mecánica, dotado de rodamientos proporciona un control sencillo y preciso durante toda la vida útil del tractor, el radio de giro reducido de 40,6 cm, ofrece una buena maniobrabilidad. Las dos barras de dirección equilibran las cargas de dirección y reducen los errores en la dirección.

Formado por una rueda dentada (piñón) y un engranaje plano (cremallera), al girar el piñón desplaza la cremallera en línea recta. Transmite el movimiento y lo transforma de rectilíneo a circular y viceversa.

El trabajo que se presenta en este artículo, consta de un servomecanismo con un motor de corriente directa, acoplado mecánicamente al eje del volante como se aprecia en Figura 2, para mayor detalle ver [19].



Fig. 2. Mecanismo acoplado motor-eje de transmisión.

La medición del ángulo de salida en la dirección del vehículo, se realizó a través del acoplamiento de un potenciómetro multivuelta concéntrico al eje longitudinal del volante de la dirección, por medio de dicho dispositivo electrónico es posible registrar un voltaje directamente relacionado con la posición final del ángulo de salida de las llantas directrices del vehículo.

Se realizaron experimentos de posicionamiento de la dirección en lazo abierto, para determinar un modelo del sensor de posición o el ángulo de salida del modelo de la dirección Ackerman, en específico del RT en estudio. La ecuación (1) muestra el resultado del modelo obtenido:

$$\theta(v) = (34.9839)v - 12.8257, \quad (1)$$

donde $\theta(v)$ es el ángulo de salida en la dirección del vehículo, v es el voltaje de salida del amplificador de instrumentación.

2.1. Motor de CD

El modelo de motor de CD empleado es de la marca SHINANO KENSHI, con un torque de $1.5Nm$, $24VCD$, $300RPM$, $1/12hp$. El circuito eléctrico de la armadura y el diagrama de cuerpo libre del rotor se muestran en la Figura 3.

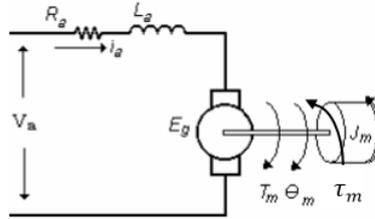


Fig. 3. Circuito equivalente del motor de CD.

En el circuito equivalente se introducen las siguientes variables:

- R_a resistencia de armadura.
- L_a inductancia de armadura.
- v_a voltaje de entrada equivalente en este caso al *PWM* suministrado.
- i_a corriente que circula por el circuito.
- E_g representa la fuerza contraelectromotriz.
- T_m par producido.
- θ_m desplazamiento angular.
- J_m momento de inercia.
- τ_m fricción en el sistema.

$$V_a(s) = R_a I_a(s) + L_a I_a(s) \cdot s + E_g(s). \quad (2)$$

El voltaje de entrada $V_a(s)$, es equivalente a una señal de control *PWM* (s) se reescribe la ecuación (2) y se obtiene (3):

$$PWM(s) = R_a I_a(s) + L_a I_a(s) \cdot s + E_g(s). \quad (3)$$

Se obtiene la función de transferencia de velocidad $\omega(s)$, con respecto de la entrada v_a , la ecuación de la función de transferencia se muestra a continuación (4):

$$\frac{\omega(s)}{PWM(s)} = \frac{k_a}{J_m L_a s^2 + (J_m R_a + \tau_m L_a) s + (k_b k_a + \tau_m R_a)}. \quad (4)$$

En el presente trabajo, el interés es modelar la posición angular, se sabe que la posición se expresa como (5):

$$\theta(s) s = \omega(s). \quad (5)$$

Se despeja $\theta(s)$ de la ecuación (5) y se sustituye $\omega(s)$ de la ecuación (4), para obtener la función de transferencia de la posición $\theta(s)$ con respecto al voltaje *PWM* de entrada, y se obtiene (6):

$$\frac{\theta(s)}{PWM(s)} = \frac{k_a}{J_m L_a s^3 + (J_m R_a + \tau_m L_a) s^2 + (k_b k_a + \tau_m R_a) s}. \quad (6)$$

La ecuación (6) indica la relación que existe entre la posición angular del motor y la señal de excitación.

3. Parametrización del sistema

Se realizaron experimentos de la manipulación del ángulo de salida de las ruedas directrices del RT, con señales conocidas y acotadas en el dominio del funcionamiento normal de la dirección del RT. Los resultados de la medición entrada-salida, se almacenaron en una base de datos, con un periodo de muestreo de $20ms$. En la Figura 4, se muestran datos experimentales de la medición de la posición del ángulo de salida en las ruedas del RT, la respuesta a la variable de entrada (PWM) se ilustra en la Figura 5.

Los datos mostrados en las Figuras 4 y 5, se emplearon para realizar el aprendizaje del modelo difuso que se presenta en este trabajo. Los experimentos realizados se muestran en [19], donde se empleo un modelo a partir de la técnica ANFIS, del cual se obtuvo un controlador que permitió realizar una primer prueba experimental para poder estudiar la dinámica de operación del servomecanismo de la dirección, y así obtener los datos necesarios para realizar el modelo que se presenta en este artículo, la identificación de operación de los parámetros se realizó en lazo cerrado.

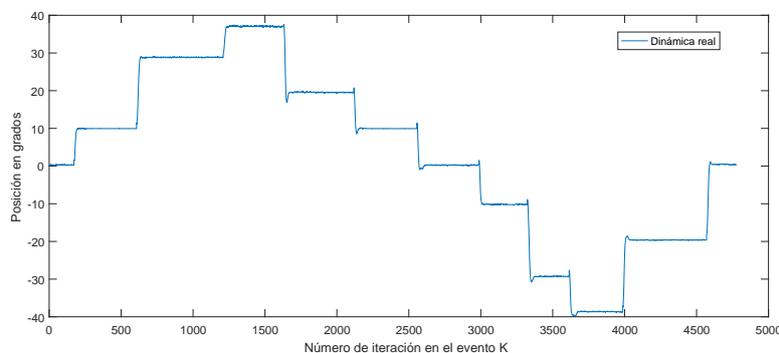


Fig. 4. Dinámicas de la variable de salida para obtener un modelo por aprendizaje.

Mediante la herramienta *ident* de Matlab y tomando como referencia el comportamiento real del sistema, se obtuvieron dos submodelos en representación de función transferencia en forma discreta que describen dos dinámicas del sistema; se obtuvo una primera función de transferencia para todas las dinámicas de movimiento con un ángulo positivo y por otra parte se obtuvo una segunda función de transferencia para las dinámicas de movimiento con ángulo negativo.

Los modelos resultantes de cada una de las dinámicas del sistema se obtuvieron en el dominio de z , con una entrada PWM , y a la salida la posición

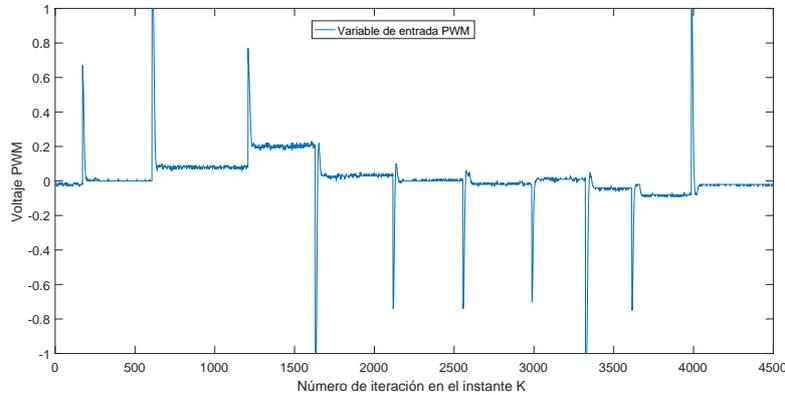


Fig. 5. Variable de la entrada PWM, para modelar el sistema entrada-salida.

en grados del sistema (POS), a continuación se presentan las dos funciones de transferencia resultantes.

La función de transferencia que describe todas las dinámicas positivas se observa en la ecuación (7):

$$\frac{POS(z)}{PWM(z)} = \frac{0.3314z + 0.2832}{z^2 - 1.622z + 0.6239}. \quad (7)$$

La representación de la función de transferencia para las dinámicas negativas del sistema se presenta en la ecuación (8):

$$\frac{POS(z)}{PWM(z)} = \frac{0.1329z + 0.1205}{z^2 - 1.743z + 0.7438}. \quad (8)$$

4. Estrategia de control

Se propone un control de tipo proporcional más integral (PI) para cada una de las funciones de transferencia obtenidas, que representan la dinámica de operación para que el volante del RT gire a izquierda o derecha. Por medio de la herramienta PID-Tune de Matlab, se sintonizó el controlador PI , en la Figura 6 se muestra el diagrama a bloques del controlador y la planta con retroalimentación unitaria para la función de transferencia de ambas dinámicas de operación, del mismo modo se realizó este proceso para el submodelo con las dinámicas negativas del sistema.

Se proponen dos reglas difusas del tipo TS con funciones de pertenencia del tipo Gaussiana; los centros de cada submodelo se definieron en 25 y -25 respectivamente para el submodelo con dinámicas positivas y el submodelo con dinámicas negativas, la distribución normal σ se definió con un valor de 10 para cada uno de los submodelos como se aprecia en la Figura 7.

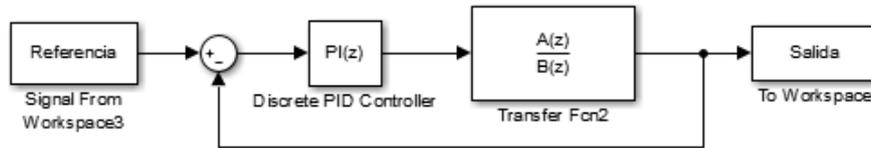


Fig. 6. Diagrama a bloques para ambos submodelos lineales en lazo cerrado.

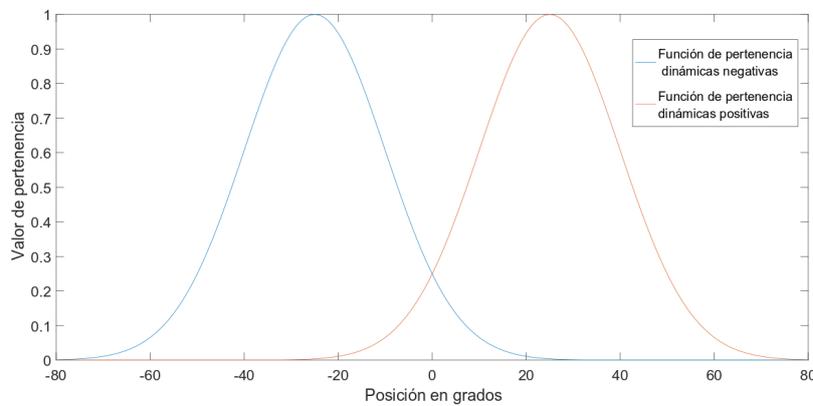


Fig. 7. Funciones de pertenencia para el modelo y controlador difuso.

El valor de activación β en cada submodelo se presenta en las siguientes dos ecuaciones (9, 10):

$$\beta_1 = e^{-\frac{(pos-c_1)^2}{2(\sigma_1)^2}}, \quad (9)$$

$$\beta_2 = e^{-\frac{(pos-c_2)^2}{2(\sigma_2)^2}}. \quad (10)$$

Para obtener un controlador difuso PDC, se aplica la técnica de T-S a los dos submodelos difusos que se describen a continuación, con la estructura de reglas difusas. Se nombró f_1 al submodelo con dinámicas positivas y f_2 al submodelo con dinámicas negativas:

$$R_1: \text{ Si } pos(k) \text{ esta en positivo entonces} \\ f_1 = 1.622 \cdot pos(k) - 0.6239 \cdot pos(k-1) + 0.3314 \cdot U_{Gm} + 0.2832 \cdot U_{Gm}(k-1),$$

$$R_2: \text{ Si } pos(k) \text{ esta en negativo entonces} \\ f_2 = 1.743 \cdot pos(k) - 0.7438 \cdot pos(k-1) + 0.1329 \cdot U_{Gm} + 0.1205 \cdot U_{Gm}(k-1).$$

Para el cálculo de la posición $pos(k + 1)$ en el modelo aproximado, la defusificación que se emplea es pesos ponderados, se presenta en la siguiente ecuación:

$$pos(k + 1) = \frac{\sum_{i=1}^2 \beta_i f_i}{\sum_{i=1}^2 \beta_i}. \quad (11)$$

5. Modelo difuso

Es posible diseñar un modelo difuso que represente el comportamiento global del sistema real con sus dinámicas reales, la ley de control difusa U_{Gm} global, se obtiene a partir de la agregación de los submodelos difusos determinada con el método de varicentro en la siguiente ecuación (12):

$$U_{Gm} = \frac{\sum_{i=1}^R \beta_i ((Kp_i + Ki_i) e_{modelo}(k) - Kp_i e_{modelo}(k - 1) + U_{Gm}(k - 1))}{\sum_{i=1}^R \beta_i}, \quad (12)$$

donde:

- β_i es el valor de disparo de la i -ésima regla,
- Kp_i es la i -ésima ganancia proporcional del i -ésimo controlador,
- Ki_i es la i -ésima ganancia integrativa del i -ésimo controlador,
- $e(k)$ es el error en lazo cerrado, de la posición en el k -ésimo evento: $e = referencia - posicionreal$,
- $e(k - 1)$ es el error de la posición en un evento anterior k .

En la Figura 8 se presenta un diagrama a bloques del control en lazo cerrado y el modelo difuso operando en paralelo.

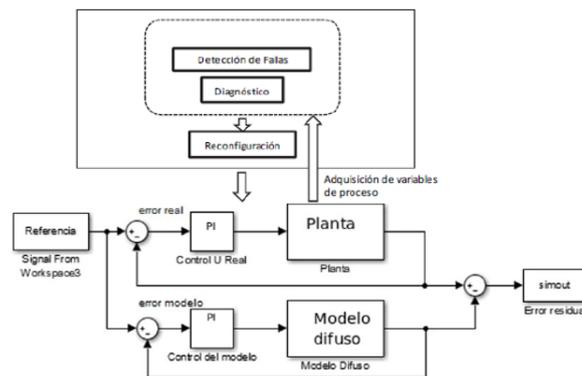


Fig. 8. Esquema de detección de fallas con el error residual.

6. Control PDC

A continuación se presenta la base de reglas para el controlador PDC compuesto por cada submodelo:

$$R_1 : \text{ Si } pos(k) \text{ esta en angulo positivo entonces} \\ u_1 = ((Kp_1 + Ki_1) e(k) - Kp_1 e(k - 1) + U_{GC}(k - 1)),$$

$$R_2 : \text{ Si } pos(k) \text{ esta en angulo negativo entonces} \\ u_2 = ((Kp_2 + Ki_2) e(k) - Kp_2 e(k - 1) + U_{GC}(k - 1)),$$

Se generó una U_{GC} global de control, a partir de hacer un mapeo en las posición real contra cada función de pertenencia, se obtiene la variable de entrada U_{GC} en cada iteración, a continuación se presenta la ecuación (13) que representa el valor de U_{GC} :

$$U_{GC} = \frac{\sum_{i=1}^R \beta_i ((Kp_i + Ki_i) e(k) - Kp_i e(k - 1) + U_{GC}(k - 1))}{\sum_{i=1}^R \beta_i}. \quad (13)$$

En la Figura 9, se observa el resultado en tiempo real de la regulación del sistema de dirección, para llegar a una posición con el controlador difuso PDC PI.

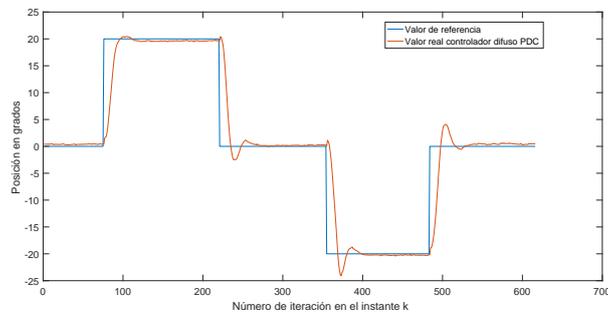


Fig. 9. Regulación de posición utilizando el controlador difuso PDC PI.

7. Resultados

En la Figura 10, se muestra el resultado en tiempo real de la regulación de la planta y el modelo ambos con el control PDC PI de forma paralela.

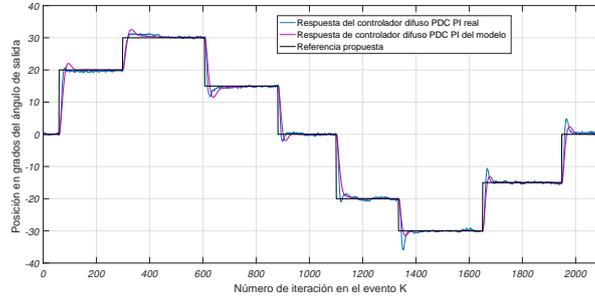


Fig. 10. Regulación de la dirección en tiempo real con control difuso PDC PI real y control difuso del modelo con PDC PI.

En la Figura 11, se muestra el comportamiento en tiempo real del diagnóstico, detección y aislamiento de la falla inducida en el sistema, la cual consiste en adicionar una elevación de 40 unidades a la posición medida, se observa como la salida real del sistema se eleva 40 unidades como se simula la falla en tiempo real, al mismo tiempo se observa como el modelo difuso en lazo cerrado con el control PDC sigue la referencia propuesta a pesar de que no existe un valor real del sensor de posición.

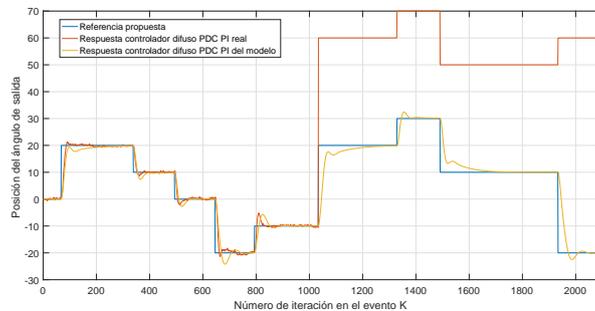


Fig. 11. Diagnóstico y aislamiento de la falla producida en el sistema real.

En la Figura 12, se observa con el error residual sobrepasa una banda establecida de .5 grados, discriminando el evento transitorio y considerando un error en estado estacionario absoluto de .5 grados entre el error real y el error del modelo, el tiempo transitorio no sobrepasa el límite establecido.

En la Figura 13, se muestra como la variable de excitación *PWM* del control real es aislada y se lleva a cero, en este instante el control del modelo difuso conmuta para excitar a la planta en tiempo real, para llevarla a las posicio-

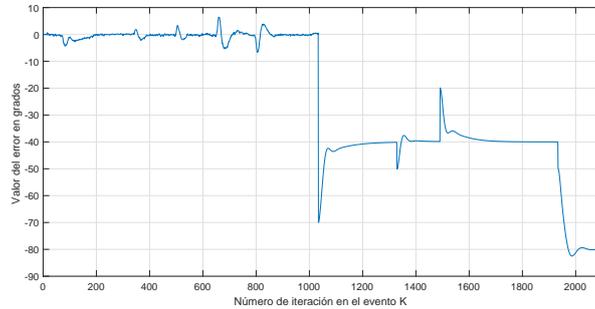


Fig. 12. Comportamiento del error residual ante la falla.

nes deseadas y completar la tarea, aún con el sensor de posición en modo de degradación.

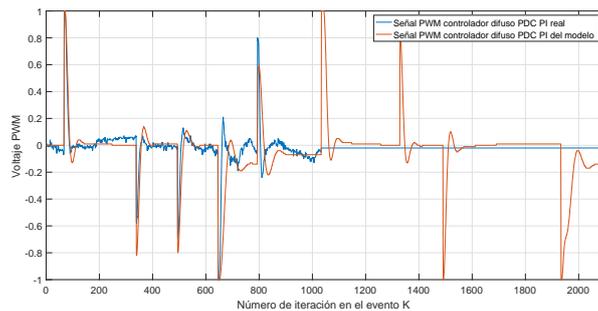


Fig. 13. Señal de control PDC PI con sensor y señal de control PDC PI del modelo difuso.

8. Conclusiones y trabajo futuro

Se diseñó un modelo difuso por aprendizaje de datos reales y con consecuentes en función transferencia del sistema de dirección del RT. Fue posible proponer y desarrollar una estrategia de control que permitió la correcta regulación de la posición en tiempo real, por medio de un controlador difuso PDC PI, los controladores de cada submodelo se sintonizaron con la herramienta de Matlab PID-Tune, se obtuvieron resultados en tiempo real de la regulación del ángulo de salida de la dirección del RT, con error de posición promedio menor a 0.5 grados.

La ley de control diseñada permitió regular la salida del sistema de dirección en la posición del ángulo de salida. Se produjo una falla al sistema provocando

una elevación de lectura en el sensor de posición de ángulo de salida, y se constató que el error residual de la variable medida con el modelo aproximado en lazo cerrado, es útil para conmutar a modo de degradación del sensor, con regulación del sistema en las posiciones deseadas por el usuario.

Se realizó un control difuso PDC PI para el modelo difuso diseñado, que trabaja de forma paralela al control con el sensor en tiempo real. El modelo obtenido es la base para la detección de fallas del sistema en estudio, por medio del error residual entre la salida real del sistema y la salida que determina el modelo difuso, esto hace posible la detección y el aislamiento de una falla de sensor.

8.1. Trabajo futuro

El modelo y control difuso que se ilustra en este trabajo, da la posibilidad de realizar una nueva investigación para establecer criterios de diagnóstico y detección de fallas, bajo premisas como la energía disipada y el tiempo de restablecimiento del sistema en diferentes condiciones reales de terrenos en la navegación del robot tractor.

Agradecimientos. El autor Raúl Cortes-Gutiérrez es becario CONACyT No. 611156. Los autores agradecen al CONACyT y al Laboratorio Nacional en Vehículos Autónomos y Exoesqueletos No. 295536, por el apoyo económico en este proyecto.

Referencias

1. Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin K., Kavuri S.: A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, 27(3), pp. 293–311. DOI: 10.1016/S0098-1354(02)00160-6. (2003)
2. Angeli, C., Chatzinikolaou, A., Patsi, S.: On-Line Fault Detection Techniques for Technical Systems: A Survey. *International Journal of Computer Science and Applications*, I(1), pp. 12–30 (2004)
3. Wang, L.X.: Fuzzy systems are universal approximators. In: *Proceeding of the 1st IEEE Conference on Fuzzy Systems*, pp. 1163–1170 (1992)
4. Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, V., Kavuri, S., Yin, K.: A review of process fault detection and diagnosis Part II: Qualitative models and search strategies. *Computers and Chemical Engineering*, 27(3), pp. 313–326. DOI: 10.1016/S0098-1354(02)00161-8 (2003)
5. Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, V., Kavuri, S., Yin, K.: A review of process fault detection and diagnosis. Part III: Process history based methods. *Computers and Chemical Engineering*, 27(3), pp. 327–346. DOI: 10.1016/S0098-1354(02)00162-X (2003)
6. Blej, M., Azizi, M.: Comparison of Mamdani-Type and Sugeno-Type Fuzzy Inference Systems for Fuzzy Real Time Scheduling. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(22), pp. 11071–11075 (2016)

7. Abdullah, J.H., Al-Gizi, M.W., Mustafa, M., Alsaedi, A., Zreen, N.: Fuzzy Control System Review. Department of electrical International Journal of Scientific and Engineering Research, 4(1) (2013)
8. Mann, G.K.I., Bao-Gang, H., Member, R., Gosine, G.: Analysis of Direct Action Fuzzy PID Controller Structures. Transactions on systems, man, and cybernetics—part b: Cybernetics, 29(3) (1999)
9. Aceves-Lopez, A., Aguilar-Martin, J.: A simplified version of Mamdani's Fuzzy Controller: The Natural Logic Controller. Fuzzy Syst, 14(1), pp.16–30 (2006)
10. Radu-Emil, P., Hans, H.: A survey on industrial applications of fuzzy control. Computers in Industry (2010)
11. Babuska, R., Verbruggen, H.B.: A survey on industrial applications of fuzzy control. Control Engineering Practice, 4(11), pp. 1593–1606 (1996)
12. Sala, A., Guerra, T.M., Babuska, R.: Perspectives of fuzzy systems and control. Fuzzy Sets and Systems, 156(3), pp. 432–444 (2005)
13. Cao, S.G., Rees, N.W., Feng, G.: Analysis and design of fuzzy control systems using dynamic fuzzy global models. Fuzzy Sets and Systems, 75(1), pp. 47–62 (1995)
14. Tanaka, K., Wang, H.O.: Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach. John Wiley and Sons (2001)
15. Noboru, N.: Japan Agriculture based on Robot Faming System. Hokkaido University, 9(9), pp. 065–8589 (2001)
16. Liangliang, Ch.Z., Liangliang, Y., Noboru, N.: Development of a Human-driven tractor following a Robot System. Laboratory of Vehicle Robotics, Graduate School of Agriculture (2014)
17. INEGI: Estadísticas a propósito del... día del Trabajador Agrícola (15 de Mayo). (2015)
18. MILENIO: Política milenio.com. <http://www.milenio.com/politica>. (2018)
19. Padre-Nonthé, J.D.: Instrumentación de los servomecanismos de un tractor agrícola. Tesis de Maestría, Posgrado en Mecatrónica PNPC Universidad Politécnica de Pachuca (2018)
20. Fernandez, B., Herrera, P.J., Cerrada, J.A.: Self-tuning regulator for a tractor with varying speed and hitch forces. Computers and Electronics in Agriculture, 145, pp. 282–288 (2018)
21. Avital, B., Vigneault, C.: Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems. Institute of Agricultural Engineering, Agricultural Research Organization, The Volcani Center (2017)
22. Leea, D., Yia, K., Changb, S., Leeb, B., Jangc, B.: Robust steering-assist torque control of electric-power-assisted-steering systems for target steering wheel torque tracking. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University (2018)
23. Aghkhani, M.H., Abbaspour-Fard, M.H.: Automatic off-road vehicle steering system with a surface laid cable: Concept and preliminary tests. Research Center for Agriculture Machinery (RCAM), College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad (2009)
24. Chang-Shenga, F., Yan-linga, G.: Design of the Auto Electric Power Steering System Controller. Northeast Forestry University (2012)
25. Zhang, Q., Wu, D., Reid, J.F., Benson, E.R.: Model recognition and validation for an off-road vehicle electrohydraulic steering controller Agricultural Engineering Department, University of Illinois at Urbana–Champaign (2002)
26. Zhang, Q., Wu, D., Reid, J.F., Benson, E.R.: Fault Diagnosis and Safety Design of Automated Steering Controller and Electronic Control Unit (ECU) for Steering Actuator. California PATH Research Report (2005)