Capítulo 1.

Diseño de un controlador difuso de temperatura para la cabina de vehículos que previenen problemas de somnolencia en los conductores

Mario Ernesto Serrato Maldonado[1]
Robin Alfonzo Blanco Cañón[2]
Juan Emilio Sanabria Sanabria[3]

Cítese como: Serrato-Maldonado, M. E., Blanco-Cañón, R. A. y Sanabria-Sanabria, J. E. (2023). Diseño de un controlador difuso de temperatura para la cabina de vehículos que previene problemas de somnolencia en los conductores. En F. C. Gómez-Meneses, E. M. Moncayo-Torres y T. M. Piamba, (comps.), *Aplicaciones tecnológicas de la Ingeniería Mecatrónica y sus impactos al desarrollo socioeconómico* (pp. 10-25). Editorial UNIMAR. https://doi.org/10.31948/editorialunimar.214.c363

Resumen

Con el creciente avance de los sistemas inteligentes, se hace necesaria la implementación de este tipo de sistemas de control, con herramientas económicas. Este documento aborda el diseño de un controlador de temperatura, partiendo de una base de conocimiento, realizando el ajuste del controlador a partir de la superficie de control, para facilitar la implementación de controles difusos en sistemas embebidos de bajo costo.

Palabras clave: controlador difuso; ADAS; MATLAB; Sistemas embebidos.

Design of a fuzzy controller of temperature for the cabin of vehicles preventing problems of sleepiness in drivers

Abstract

With the increasing advance of intelligent systems, it is necessary to implement this type of control system, with economic tools. This paper addresses the design of a temperature controller, starting from a knowledge

[1] Programa de Ingeniería Mecatrónica, Universidad ECCI. Bogotá, Colombia. Correo: marioe.serratom@ecci.edu.co
[2] Programa de Ingeniería Mecatrónica, Universidad ECCI. Bogotá, Colombia. Correo: rblancoc@ecci.edu.co
[3] Programa de Ingeniería Mecatrónica, Universidad ECCI. Bogotá, Colombia. Correo: jsanabrias@ecci.edu.co

base, performing the controller tuning from the control surface, to facilitate the implementation of fuzzy controls in low-cost embedded systems.

Keywords: fuzzy controller; ADAS; MATLAB; Embedded systems.

Projeto de um controlador fuzzy de temperatura para a cabine de veículos, prevenindo problemas de sonolência nos motoristas

Resumo

Com o crescente avanço dos sistemas inteligentes, é necessário implementar esse tipo de sistema de controle com ferramentas econômicas. Este artigo aborda o projeto de um controlador de temperatura, partindo de uma base de conhecimento, realizando o ajuste do controlador a partir da superfície de controle, para facilitar a implementação de controles fuzzy em sistemas embarcados de baixo custo.

Palavras-chave: controlador fuzzy; ADAS; MATLAB; sistemas embebidos.

Introducción

La conducción de vehículos es una tarea que requiere de varias habilidades, tanto psicológicas como psicomotrices, lo que implica una carga considerable al conductor, tornándolo susceptible a ser afectado por situaciones externas fuera de su control.

La masificación de los vehículos a nivel mundial ha ocasionado que los errores presentes al momento de conducir propicien víctimas humanas y daños materiales considerables; actualmente se ha diseñado una gran variedad de sistemas para la identificación de las causas de un accidente vial, teniendo en cuenta las variables presentes en el choque (Serrato et al., 2022; Organización Panamericana de la Salud (OPS) y Organización Mundial de la Salud (OMS), 2018; Rey de Castro et al., 2004; Rey de Castro et al., 2009; Rey de Castro y Rosales-Mayor, 2015).

Las soluciones a los problemas presentes debido a los errores humanos han sido expuestas mediante la implementación de sistemas de ayuda al conductor (ADAS[4]); sin embargo, muchas de ellas han quedado como sistemas opcionales, debido al costo de implementación e instalación. Junto con las innovaciones tecnológicas que se ha hecho a lo largo de estos años y los avances legislativos en algunos países, se ha reglamentado la instalación de ADAS obligatorios en vehículos nuevos (Biondi et al., 2017; Planning, 2014; Motorpasión para marcas, 2020).

[4] Por sus siglas en inglés: Advanced driver-assistance systems.

Las limitaciones presentes en la implementación de ADAS como un estándar comercial son debidas, principalmente, a los costos asociados; como respuesta, se ha hecho diversas innovaciones, dada la posibilidad de implementar sistemas de control y procesadores de bajo costo, ligados a nuevas estrategias de control inteligente (Shaodong et al., 2022).

ADAS

Los ADAS son un sistema inteligente o conjunto de sistemas encargado de mejorar la seguridad vial, en términos de prevención de choques y comodidad al conducir. A lo largo de los años, las legislaciones de cada país han impuesto sistemas como ADAS obligatorios como el *Anti-lock Braking System* (ABS, Sistema de freno antibloqueo) y el *Electronic Stability Program* (ESP, Control electrónico de estabilidad), con el fin de ofrecer mayor seguridad a los actores viales (Motorpasión para marcas, 2020; Shaodong et al., 2022).

Dentro de la gran variedad de ADAS en el parque automotriz, los más conocidos son: la velocidad crucero y el asistente de parqueo. De igual manera, existen **ADAS relativamente nuevos, como la detección de somnolencia o apnea obstructiva del sueño, los cuales se encuentran explicados al detalle en trabajos previos (Serrato et al., 2022).**

Lógica difusa

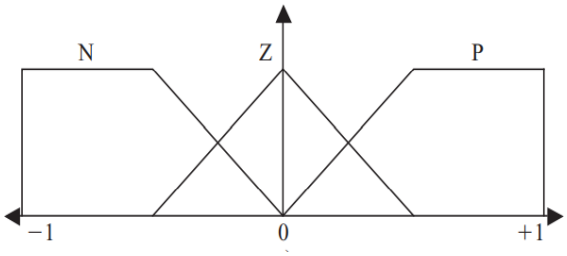
La lógica difusa se ha estado usando como una herramienta de control para diversas aplicaciones, debido a la flexibilidad que presenta al acercarse a la forma como una persona toma decisiones. Para lograr tomar decisiones como lo haría un humano, esta tiene que transformar los datos cuantitativos que recibe del exterior, a variables lingüísticas, las cuales pueden ser evaluadas con una base de conocimiento otorgada por un experto para el funcionamiento del sistema y, finalmente, convertirlas a valores cuantitativos para que puedan ser controlados o visualizados. Este proceso se divide en tres etapas: Fuzzificación, Análisis de Reglas y Defuzzificación (Ponce, 2010; Vinh Thang et al., 2021).

Fuzzificación

Realiza la medición de las variables de entrada del sistema y un mapeo a escala para transferir los valores de estas a un universo de discurso difuso (Variables lingüísticas), logrando modificar estos datos mediante la generación de conjuntos difusos que le darán un grado de pertenencia a los datos medidos, dependiendo de la forma y la disposición de los mismos, como se puede ver en la Figura 1.

Figura 1

Conjuntos para un controlador difuso



Fuente: Ponce (2010).

Análisis de reglas

Se hace una evaluación de las variables lingüísticas activadas con respecto a la base de información proporcionada por el experto, para determinar qué acción se tomará a la salida del controlador; esta base de conocimiento variará, dependiendo del tipo de aplicación que se vaya a realizar; se puede plantear, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Análisis de reglas para un Controlador de humedad en invernaderos

Humedad (%)			
Poco	Normal	Mucho	
OFF	OFF	ON	Ventilador
ON	OFF	OFF	Humidificador

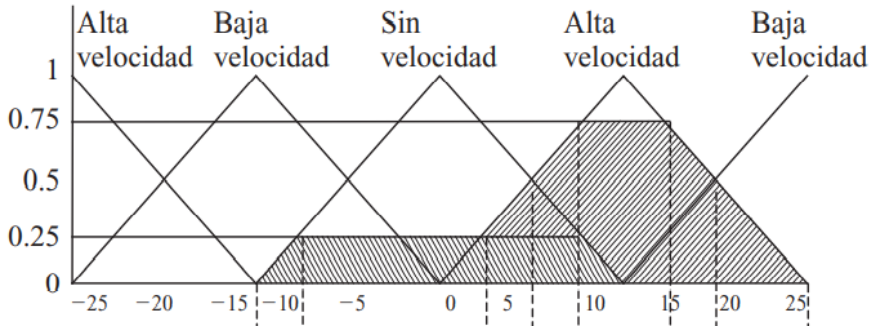
Fuente: Ponce (2010).

Defuzzificación

Efectúa la reintegración de las decisiones tomadas por la base de conocimiento y genera un valor cuantitativo a la salida, mediante la evaluación de los grados de pertenencia generados en la fuzzificación y las reglas activadas en el análisis de reglas; el valor final generado se da a partir del centroide del conjunto de salida, el cual se puede obtener por diversas metodologías que pueden variar, dependiendo de las capacidades del procesador y los requerimientos de la aplicación; un ejemplo: un conjunto difuso de salida y la figura resultante tras la evaluación del grado de pertenencia y el análisis de reglas (Ponce, 2010).

Figura 3

Conjuntos difusos de salida para un sistema detector de velocidad



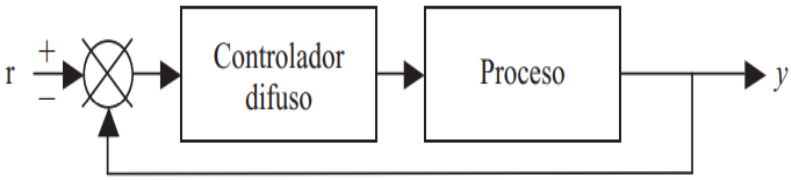
Fuente: Ponce (2010).

Control difuso

Los controladores difusos se caracterizan por no requerir la identificación de la planta para el diseño del controlador. Actualmente, los sistemas inteligentes son ampliamente usados para el control de diversas tareas, generando gran variedad de proyectos (Vinogradov et al., 2019). Los controladores difusos pueden tener diferentes configuraciones, requiriendo las etapas de la fuzzificación, análisis de reglas y la defuzzificación, con una diferencia específica: en la entrada del sistema difuso se requiere la entrada del valor de error, presente en la diferencia de la referencia con respecto a la salida del sistema, como se puede ver en la Figura 4 (Ponce, 2010).

Figura 4

Lazo clásico de un controlador difuso



Fuente: Ponce (2010).

En la Universidad ECCI, debido a los estudios presentes en el semillero RVCAR[5], en búsqueda de nuevos sistemas de control como productos novedosos y de bajo costo, se plantea un sistema de control basado en

[5] Realidad Virtual y Control para Automatización y Robótica

inteligencia artificial, que hace parte del desarrollo de un trabajo de tesis del semillero, donde el vehículo de implementación y la forma de implementación han sido mencionados en trabajos previos (Serrato et al., 2022).

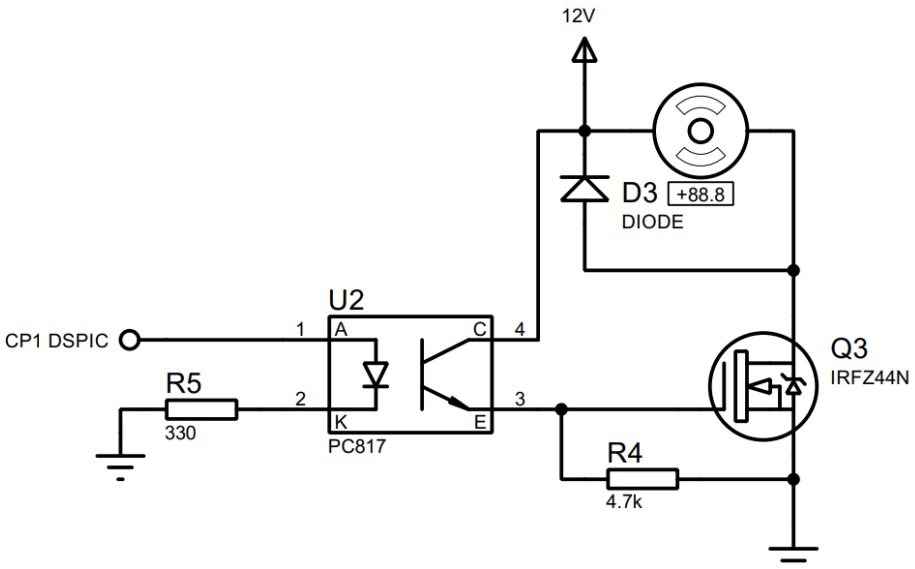
Desarrollo

Identificación de actuadores, sensores y etapas de potencia necesaria

El sistema de control de temperatura propuesto estuvo enfocado para que fuera usado en un Fiat 147 modelo 83, por lo cual, dentro de las primeras actividades realizadas se hizo la identificación de los elementos de fábrica del vehículo, para modificar la temperatura a su interior. En este caso, se tenía disposición de un ventilador de 12V a 3 amperios, con un pico de corriente de aproximadamente unos 4 amperios (Serrato et al., 2022). Con la información obtenida se procedió a hacer un diseño electrónico para la etapa de potencia, identificando dos posibles tipos de transistores para controlar el paso de corriente hacia el motor transistor de construcción: BJT y JFET, escogiendo finalmente el JFET, dado que presenta una menor tasa de pérdida de potencia al momento de conmutar, respecto al BJT. El diseño implementado se puede apreciar en la Figura 5.

Figura 5

Montaje de potencia Ventilador 12V 3A



Para la selección del transistor se usó un transistor JFET IRFZ44N que puede trabajar con valores de excitación de señales TTL; sin embargo, como se puede ver en la Figura 5, se decidió integrar un optoacoplador para aislar el microcontrolador y obtener el valor de voltaje y corriente más elevado posible en el motor. Asimismo, el transistor IRFZ44N tiene la capacidad de conducir una corriente máxima de 5 amperios, cumpliendo con los requisitos de funcionamiento y otorgando un factor de seguridad.

Para la medición de la temperatura se planteó el sensor DHT 11, seleccionado para mantener valores fiables de temperatura junto con humedad medidos y la estabilidad que presenta en conexiones a distancias superiores a un metro del controlador (Serrato et al., 2022).

Controlador del sistema

Para la implementación del sistema propuesto se planteó como dispositivo de control principal, un microcontrolador DSPIC30F4013, encargado de realizar los cálculos respectivos del sistema difuso. Su selección obedeció a las ventajas presentes al momento de efectuar tareas de cálculo matemático, debido al sistema especializado DS, permitiendo realizar operaciones complejas como el cálculo de un modelo geométrico cuatro veces más rápido que un controlador de 8 bits: el PIC18F4550.

Para la selección de la metodologia de control en lazo abierto del ventilador se usó el modelo de control (PWM), para el control de velocidad a una frecuencia de 1KHz mediante el módulo comparador del DSPIC30F4013 (Serrato et al., 2022).

Para realizar la lectura de datos del sensor se ejecutó un programa basado en un algoritmo ya probado, que mostró estabilidad en la lectura de datos y evitó bloqueos del microcontrolador, debido a metodologías de *time-out* (Serrato et al., 2022).

Desarrollo del controlador difuso

Para obtener un controlador de temperatura difuso en el microcontrolador, primero hay que hacer su diseño, dado que, en el microcontrolador sería complicado ver el comportamiento de los conjuntos difusos tanto de entrada como de salida del sistema cuando esté en funcionamiento; por esta razón, se procedió a realizar el diseño del controlador difuso en la herramienta de lógica difusa proporcionada por MATLAB, donde se puede ver el comportamiento de las reglas y la acción de control resultante.

Al momento de tener los correspondientes datos a valorar y, antes de empezar a llenar los datos en la herramienta de MATLAB, se contempló cuántos serían los conjuntos difusos a implementar en el dispositivo y, si sería necesaria la implementación de la derivada del error para el controlador difuso; por eso, se hizo un planteamiento teórico de cómo se implementaría en las reglas y la cantidad de conjuntos difusos. En este caso, siguiendo las recomendaciones de Ponce (2010), se tomó las limitantes presentes en el microcontrolador junto con los requisitos de control, dado que, en este caso, el sistema no tenía que ser extremadamente preciso y, como los sensores no tenían valores decimales en su medición, no era necesaria la implementación como se mostraba en la literatura: siete conjuntos difusos tanto del error como la derivada del error; así, se escogió cinco conjuntos, dada la poca necesidad de acciones precisas de control y, la factibilidad de usar cinco conjuntos con respecto a la segunda opción de tres conjuntos difusos, debido a que se tendría transiciones más lentas de un punto máximo al punto de estabilidad del sistema, no teniendo cambios transitorios tan grandes, después de tener planteadas las condiciones de conjuntos, como se puede ver en las Figura 6 y 7, respectivamente.

Figura 6

Conjuntos de entrada sistema difuso

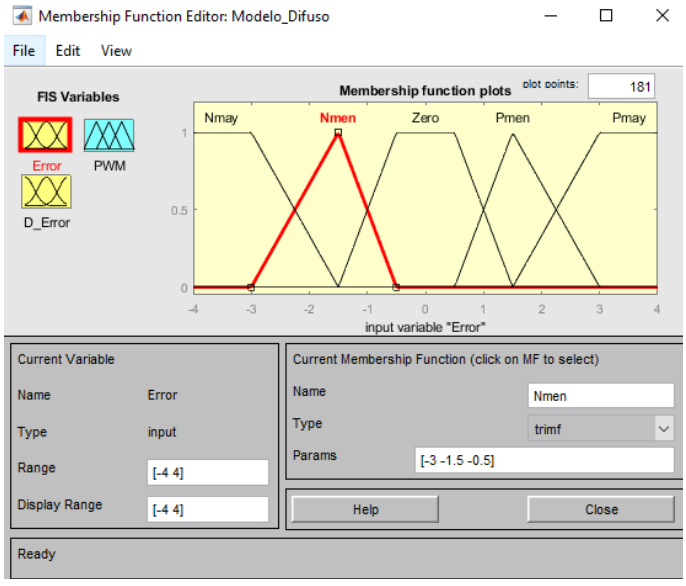
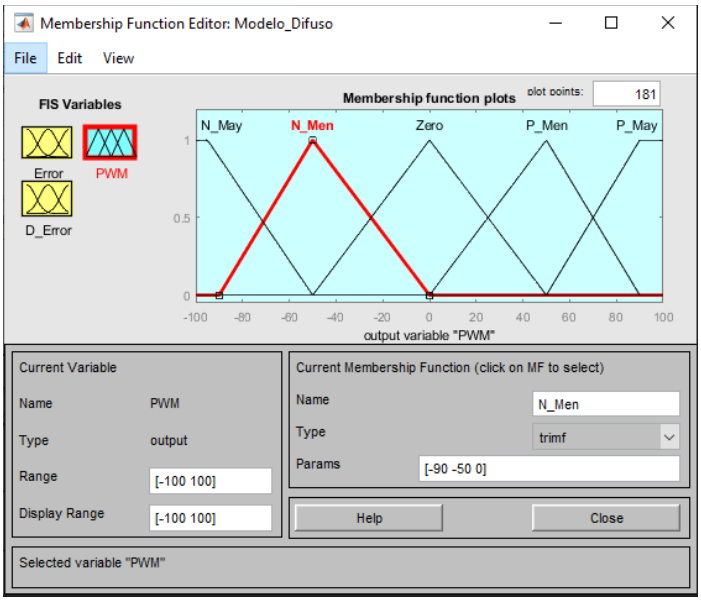


Figura 7

Conjuntos de salida sistema difuso



Una vez definidos los conjuntos difusos, se procedió a hacer el análisis de las reglas que se implementaría en el dispositivo; en este caso, dado que eran cinco conjuntos difusos, tanto el error como la derivada del error, se obtuvo 25 reglas de acción de control, como se puede apreciar a continuación, en la Tabla 1:

Tabla 1

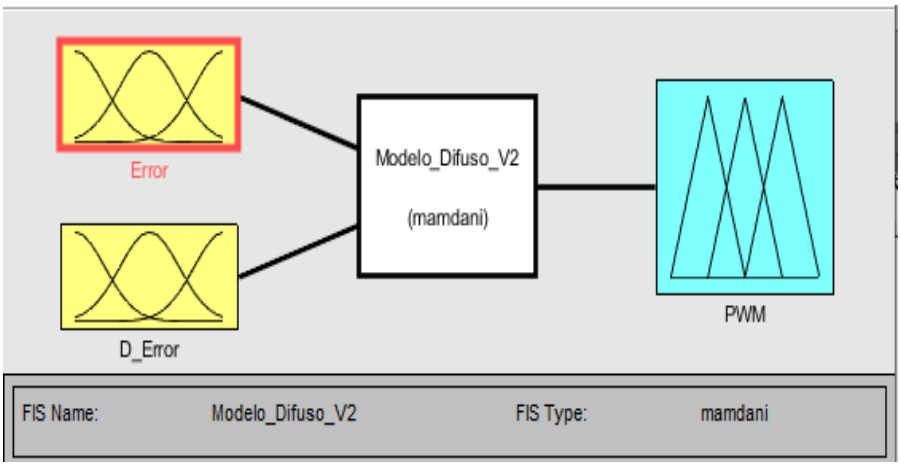
Base de conocimiento para el análisis de reglas con respecto al error y la derivada del error

Error → / D Error ↓	NM	NP	Z	PP	PM
NM	NM	NM	NP	Z	Z
NP	NP	Z	Z	Z	Z
Z	NP	NP	Z	PP	PP
PP	Z	Z	Z	Z	PP
PM	Z	Z	PP	PP	PM

Al tener un sistema que contemplaba todas las condiciones para el mecanismo de control, se procedió a realizar el montaje de estas reglas en el programa de MATLAB, obteniendo un sistema que podría ser simulado, obteniendo el controlador difuso (Figura 8).

Figura 8

Controlador difuso para control de temperatura



Con el controlador difuso montado, se dio la posibilidad de verificar que los conjuntos difusos estuviesen actuando de acuerdo con la acción de control necesaria, tanto positiva como negativa, tomando dos valores de error y obteniendo la activación de las reglas encargadas de asignar el valor de la salida. La acción positiva es el calentamiento del habitáculo y la negativa sería el enfriamiento del mismo, considerando que, cuando se tiene valores negativos, lo que se haría en el Fiat 147 sería desactivar la válvula que da paso al sistema como calefacción y, al tener un valor positivo, se activaría la válvula para calentar el habitáculo.

Con todos los sistemas en funcionamiento en el simulador de lógica difusa, se procedió a montar una planta simulada para el comportamiento del sistema, en el cual se decidió poner una planta convencional de primer orden para realizar las pruebas del sistema, como se puede ver en la Figura 9, obteniendo un sistema estable a la salida con respecto a la referencia, como indica la Figura 10.

Figura 9

Planta de simulación del controlador difuso

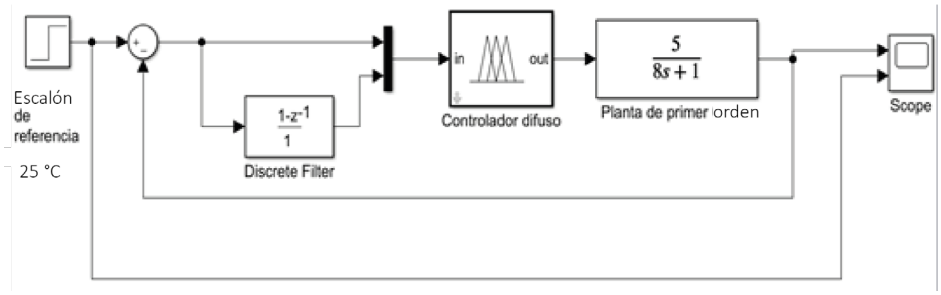
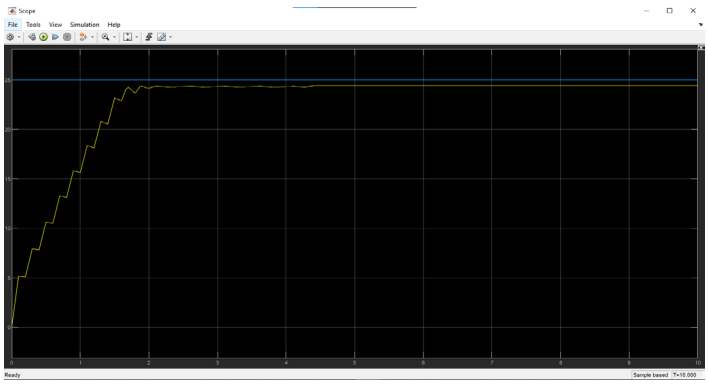


Figura 10

Respuesta del controlador frente a una referencia de 25°C



Resultados

Si bien se pudo implementar satisfactoriamente el controlador difuso en el modelo de planta presente en la Figura 9, manteniendo una respuesta estable, en el primer grupo de conjuntos difusos de entrada asignados al control difuso se presentó a la salida de la planta, un error de estado estacionario y un tiempo de estabilización de 4.5 segundos aproximadamente, como se puede observar en la Figura 10.

Realizando una evaluación de los resultados obtenidos, se identificó que la zona de estabilidad propuesta en los conjuntos iniciales era demasiado grande, como se muestra en la gráfica de superficie de control presente en la Figura 11. Teniendo en cuenta que se debía reducir el área de acción cero y las acciones tomadas por la derivada del error, se procedió a modificar los valores asignados a los conjuntos difusos, como señala la Figura 12.

Figura 11

Superficie de control con los conjuntos difusos iniciales

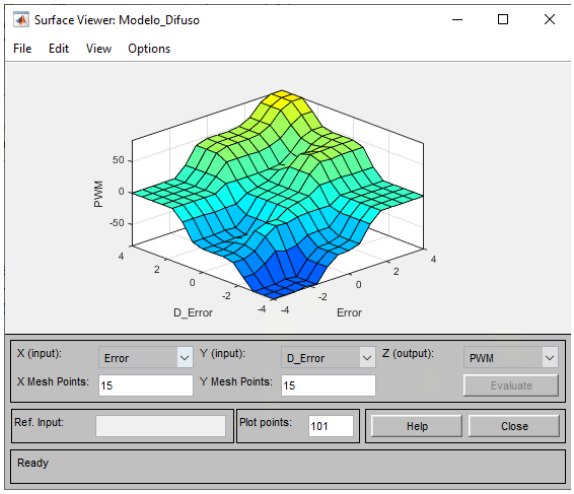
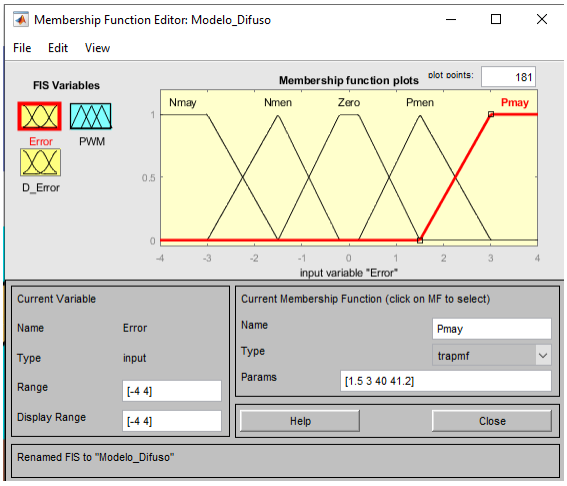


Figura 12

Conjuntos difusos después del primer ajuste



Efectuando los cambios en el conjunto difuso, se obtuvo mejores resultados en la superficie de control, teniendo similitud con respecto a la literatura consultada (Vinh Thang et al., 2021), como se puede ver en la Figura 13; no obstante, la respuesta del controlador no fue la esperada, como se puede ver en la Figura 14, razón por la cual se estrechó nuevamente la zona de acción cero en los conjuntos difusos (Figura 15); esta vez, manteniendo los conjuntos de la derivada del error.

Figura 13

Superficie de control después del primer ajuste de conjuntos difusos

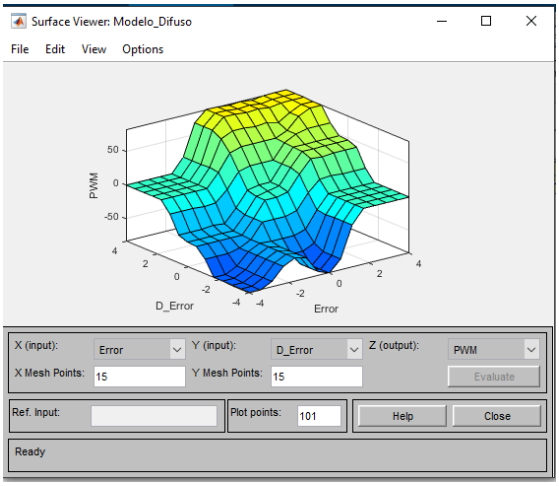
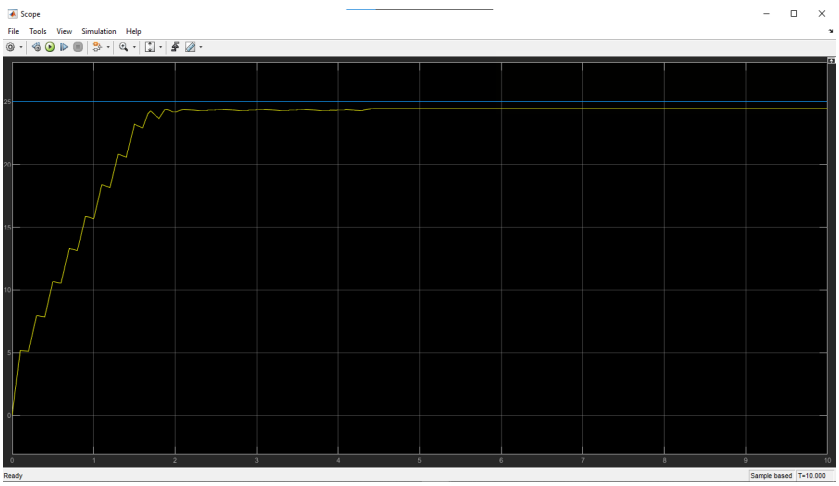


Figura 14

Respuesta de la planta después del primer ajuste



Al hacer la modificación de la Figura 15, se obtuvo una superficie de control más uniforme con una zona de acción cero muy reducida por lo cual, para que pudiese visualizarse, fue necesario aumentar la resolución de la superficie tomando 30 secciones tanto del error como de la derivada del error. La superficie resultante se puede apreciar en la Figura 16.

Figura 15

Segundo ajuste de los conjuntos difusos del error

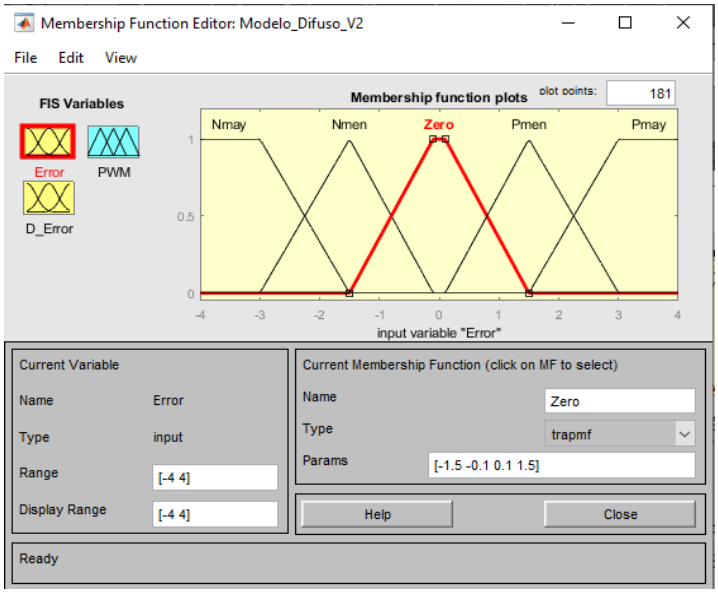
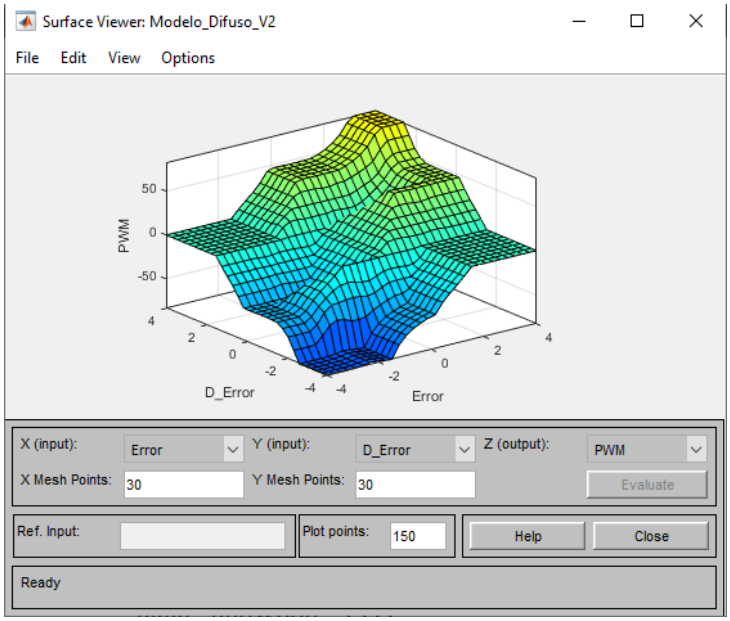


Figura 16

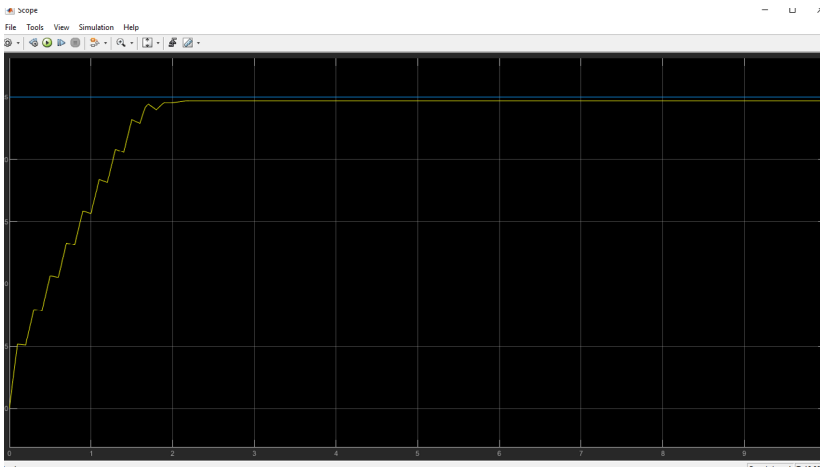
Superficie de control del controlador difuso después del segundo ajuste



Con el segundo ajuste de los conjuntos difusos se obtuvo una respuesta estable con un error de estado estacionario menor al 2 %, dando el resultado esperado para el controlador de temperatura, como se puede apreciar en la Figura 17.

Figura 17

Respuesta del sistema después del segundo ajuste de los conjuntos difusos



Conclusiones

Los controladores difusos presentan una gran ventaja respecto a los sistemas de control clásico, pero, al tener incertidumbre en el control, pueden llegar a ser inestables o tener error de estado estacionario; debido a esto, se requiere que el sistema sea provisto de una base de conocimiento de un experto y un monitoreo de la superficie de control para evitar problemas en aplicaciones de control difuso.

Para mitigar el error de estado estacionario en la respuesta del controlador al momento de usar un sistema difuso, es vital mantener una zona de acción cero de un tamaño considerablemente pequeño y, de igual manera, controlar la derivada del error para que las pendientes de la superficie no sean demasiado empinadas y que el sistema no tenga oscilación con respecto a la referencia.

Referencias

Biondi, F., Strayer, D. L., Rossi, R., Gastaldi, M., & Mulatti, C. (2017). Advanced driver assistance systems: Using multimodal redundant warnings to enhance road safety. *Applied Ergonomics*, 58, 238-244. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.06.016

Motorpasión para marcas. (2020). Sistemas ADAS, la mejor ayuda para el conductor. https://www.motorpasion.com/espaciotoyota/sistemas-adas-mejor-ayuda-para-conductor

Organización Panamericana de la Salud (OPS) y Organización Mundial de la Salud (OMS). (2018). Nuevo informe de la OMS destaca que los progresos han sido insuficientes en abordar la falta de seguridad en las vías de tránsito del mundo. https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=14857:new-who-report-highlights-insufficient-progress-to-tackle-lack-of-safety-on-the-world-s-roads&Itemid=1926&lang=es#gsc.tab=0

Planning, P. (2014). *Innovation acceptance. The case of advanced driver-assitance systems*. Springer Gabler Wiesbaden.

Ponce, P. (2010). *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México.

Rey de Castro, J., Gallo, J. y Loureiro, H. (2004). Cansancio y somnolencia en conductores de ómnibus y accidentes de carretera en el Perú: estudio cuantitativo. *Revista Panamericana de Salud Pública*, *16*(1), 11-18. https://doi.org/10.1590/S1020-49892004000700002

Rey de Castro, J., Rosales, E. y Egoavil, M. (2009). Somnolencia y cansancio durante la conducción: accidentes de tránsito en las carreteras del Perú. *Acta Médica Peruana*, *26*(1), 48-54.

Rey de Castro, J. y Rosales-Mayor, E. (2015). La somnolencia y el cansancio en conductores de ómnibus del Perú como causas de accidentes de tránsito. *Diagnóstico*, *54*(4), 216-217.

Shaodong, Z., Zhiyang, J., Yue, L., Hui, Z., & Hamid, R. K. (2022). Driver state detection for driver-automation shared control with fuzzy logic. *Control EngineeringPractice,*127.https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2022.105294

Serrato, M. E., Vigoya, A. S., Blanco, R. A. y Sanabria, J. E. (2022). Diseño de un control de calefaccion del habitáculo para problemas de somnolencia en conductores de vehículos. En *Actas o Memorias del XV Congreso CIETA*. https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_79/recursos/congresos_anteriores/cieta2022/24052022/memorias2022.jsp

Vinh Thang, L., Myo Naing, Z., Xuan Cuong, N., Dinh Hieu, L., & Anatolii, S. (2021). Research of solar tracking controller for PV panel based on fuzzy logic control. *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, (ElConRus) 2696-2699*. https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396105

Vinogradov, A., Terentev, A., Kochetkov, M., & Petrov, V. (2019). Model of fuzzy regulator of mobile robot motion control system. *Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus) 2109-2112*. https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657027