

Fuzzy Controller on Arduino Uno for an Academic Environment

Controlador Difuso en Arduino Uno para un Entorno Académico

Controlador Difuso no Arduino Uno para um Ambiente Acadêmico

Fátima Avilés-Castillo^{1*}, Jorge Buele^{1,2} and John Espinoza^{3*}

¹Department of Scientific Research, LAKEd Editorial Group
Ambato 180110, Ecuador

²Department of Electronic Engineering and Communications, University of Zaragoza
Teruel 44003, Spain

³ECA Education Centre of Australia
Brisbane 4000, Australia

*Corresponding author: E-mail: fatima@lakeditors.com

Received: 24 February 2022; Accepted: 10 March 2022; Published: 22 May 2022

Abstract

Teaching and learning processes require constant updating and the incorporation of new approaches. Higher education institutions must make critical economic investments or look for lower-cost alternatives. Therefore, this paper presents the implementation of a fuzzy control algorithm on an Arduino Uno embedded board. The fuzzy controller design has five membership functions at both input and output SISO (single input/single output). As input, we have the accumulated error value, which is the difference between the desired and measured values. Simulation tests were carried out in MATLAB's Simulink block diagram environment. At the same time, the experimental tests were developed in a didactic station that mimics an industrial pressure control process. Other parameters that are part of the process curves are also obtained for better analysis. In this way, this proposal is validated, providing information for future research.

Keywords: Fuzzy Controller, Pressure Control, Arduino, Academic Station.

Resumen

Los procesos de enseñanza – aprendizaje requieren una constante actualización y la incorporación de nuevos enfoques. Para esto las instituciones de educación superior necesitan realizar importantes inversiones económicas o buscar alternativas de menor costo. Por ello en este artículo se presenta la implementación de un algoritmo de control difuso en una tarjeta embebida Arduino Uno. El diseño del controlador difuso se realiza con cinco funciones de membresía tanto a la entrada como a la salida SISO (entrada simple/salida simple). Como entrada se tiene el valor del error acumulado que es la diferencia entre el valor deseado y el valor medido. Las pruebas de simulación se efectuaron en el entorno de diagrama de bloques Simulink de MATLAB. Mientras que las pruebas experimentales se desarrollaron en una estación didáctica que imita un proceso de control de presión industrial. También se obtienen otros parámetros que son parte de las curvas de proceso para un mejor análisis. De esta manera se valida esta propuesta, ofreciendo información para futuras investigaciones.



Copyright © Authors. This is an open access article distributed under the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Palabras Claves: Controlador Difuso, Control de Presión, Arduino, Estación Académica.

Resumo

Os créditos dentro de uma instituição financeira permitem seu crescimento econômico e expansão de negócios. Entretanto, há clientes que não estão em condições de reembolsar esses empréstimos e colocar em risco a estabilidade monetária da organização. Por este motivo, este documento tem como objetivo analisar o risco de crédito e seu impacto sobre os níveis de liquidez das instituições mútuas de poupança e crédito no Equador durante o período 2013-2018. Foi feito um diagnóstico dos processos de controle e monitoramento padrão realizados pelas cooperativas mútuas de poupança e crédito. Foi utilizada uma abordagem mista, começando com uma entrevista com os gerentes/administradores das sedes das instituições em estudo, a fim de coletar informações diretas sobre esses processos. Por outro lado, foram analisadas as demonstrações financeiras consolidadas publicadas pela Superintendência de Bancos (SB) e pela Superintendência de Economia Popular e Solidária (SEPS), considerando o período de transição. Os resultados indicam uma relação positiva e estatisticamente significativa entre as variáveis em estudo e uma fraca correlação negativa entre a liquidez e a delinquência total da carteira. É possível provar que o risco de crédito tem um impacto sobre os níveis de liquidez das instituições mútuas de poupança e de crédito habitacional do Equador durante este período.

Palavras-chave: Controlador Difuso, Controle de Pressão, Arduino, Estação Acadêmica.

1. Introducción

Las instituciones de educación superior buscan mejorar las habilidades de sus estudiantes, por lo cual invierten constantemente en la renovación de sus laboratorios [1]. Esto contribuye de manera efectiva en el proceso de formación de los estudiantes de carreras técnicas y de ingeniería. Este tipo de experimentos permiten afianzar los conocimientos teóricos por medio de la experimentación y el desarrollo de diversas prácticas. Los requerimientos del sector industrial incluyen el control de variables de nivel, presión, temperatura, flujo, etc. [2].

Existen diversos campos en los que se utilizan los controladores regulares o PID. Son configuraciones que facilitan el control de un sistema de lazo cerrado, con la finalidad de mantener una variable en un valor deseado. Éste está compuesto de tres elementos que proporcionan una acción proporcional, integral y derivativa, que justamente le otorgan su nombre. En conjunto generan una acción correctiva a partir del error que existe entre el valor medido y el deseado [3]. Con el paso del tiempo aparecieron los controladores avanzados, entre los cuales se pueden citar el MPC, adaptativo, en cascada, difuso o borroso, etc. [4]. Este último es utilizado en procesos no lineales y se basa en tres etapas que son: embrionario, reglas de membresía y desembrionario. Este controlador puede ser utilizado para diversas aplicaciones incluso en las de tipo industrial, lo cual ya se ha demostrado previamente [5].

En la industria alimenticia se ha visto su aplicación desde hace varias décadas como lo demuestra Davidson [6]. Aquí se pueden apreciar los componentes que conforman este tipo de controladores, lo cual permite comprender de mejor manera como realizar un diseño acorde con los procesos alimentarios. Este tipo de controladores permiten explorar de mejor manera la incertidumbre dentro del control de ciertos procesos. Además, incorpora más robustez, escalabilidad y es una solución de menor costo. Dentro de los entornos académicos la implementación de este tipo de herramientas aporta con mayores conocimientos para el estudiante. Dentro de su formación se puede encontrar con el control de motores mediante el control difuso, como lo muestran en [7]. También se pueden ejecutar asignaciones dedicadas en el campo de la robótica, aportando calidad, portabilidad y reducción de recursos [8]. Mientras que en [9] se puede observar un accionamiento en corriente continua usando un sistema difuso multi-cascada. En [10] se puede apreciar el control de un horno de tratamiento térmico mediante un controlador difuso Takagi-Sugeno-Kang (TSK).

Para implementar estos algoritmos en el sector manufacturero se usan PLC [5]. Dependiendo de las necesidades del usuario pueden tener costos muy elevados, por lo que las instituciones del sector público no pueden adquirirlos. La falta de renovación de equipos y las limitaciones económicas tienen una incidencia directa sobre los conocimientos de los estudiantes, por lo que se requieren cambios de manera urgente. Ante esta problemática, en el presente trabajo se implementa un controlador difuso en la tarjeta Arduino uno, para que los estudiantes realicen prácticas de control automático.

Este trabajo consta de 4 secciones, incluyendo la introducción en la sección 1. Los materiales y métodos se muestran en la sección 2. Los resultados y las conclusiones se presentan en las secciones 3 y 4 respectivamente.

2. Materiales y métodos

2.1. Tipo de investigación

Esta investigación según el objetivo es del tipo aplicada, ya que se basa en metodologías empíricas para la resolución de problemas en el campo de la educación. Los algoritmos y la información obtenida se consiguen en base a la experimentación. También es del tipo exploratoria ya que aporta información de campo que no se puede generalizar.

2.2. Enfoque

Este estudio tiene un enfoque únicamente cuantitativo, ya que se evalúan los principales parámetros de un proceso de presión, en base a la teoría de control moderno. Esta se aplica en una estación didáctica similar a una industrial, por lo que se obtienen datos numéricos que pueden ser comparados con la literatura.

2.3. Población-muestra

Este documento no tiene una población o muestra de estudio.

2.4. Técnicas e instrumentos de recopilación de datos

Los datos provenientes de la estación que simula el proceso se almacenan en un archivo con extensión .xlsx. Con esta información se pueden realizar gráficas que comparan los resultados esperados y los obtenidos.

2.5. Procedimiento

2.5.1. Estación de presión

El diseño de la planta de presión se basó en las normas ISA 5.3 e ISA 5.1, para que la nomenclatura utilizada cumpla con los parámetros internacionales. En la Fig. 1 se describen los componentes que forman parte de este sistema, donde se incluyen tuberías, tanques, válvula manual, un transmisor indicador de presión (PIT 001), un controlador (PC 001) y una válvula con posicionador (VC-1).

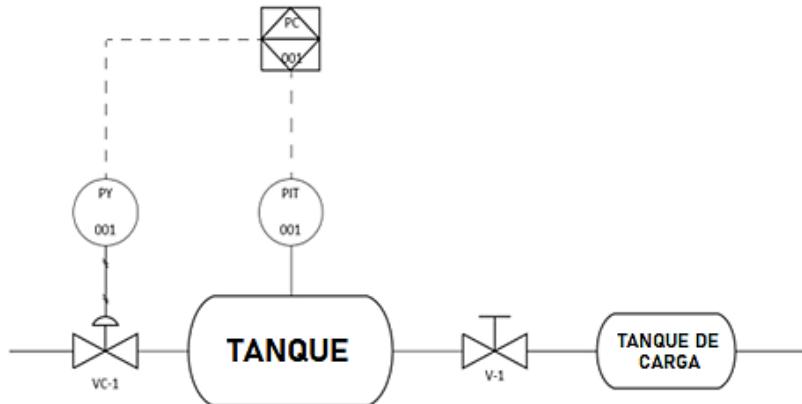


Fig. 1. Diagrama PI&D de la estación de presión.

Como controlador se utilizó la tarjeta embebida Arduino, la cual se basa en el microcontrolador ATmega328P. Un dispositivo robusto y de muy bajo costo, que es la más usada de esta familia de tarjetas. Posee 14 pines de entrada/salida, donde 6 son entradas analógicas, también posee conexión USB, alimentación externa y conexión a un sinnúmero de componentes según el proyecto que se realice. Tiene un entorno de desarrollo (IDE) propio, el cual utiliza programación estándar basado en C++ y un firmware que se ejecuta en ésta.

2.5.2. Controlador difuso tipo Mamdani

Este sistema toma decisiones y ofrece la facilidad de crear un algoritmo de control mediante el uso de variables lingüísticas. En comparación con los controles clásicos, las variables difusas pueden asumir valores entre 0 y 1, ya que se basa en reglas de tipo si - entonces. Éstas simbolizan una relación de entrada - salida que provienen de sistemas no lineales. La ventaja de este modelo es que las descripciones del sistema permiten expresar una aproximación.

Para esta aplicación se consideran el error en esta estable, el cual es la diferencia entre el valor deseado (set point SP) y el valor medido (variable de proceso PV). Una vez que se identifican estas variables de entrada y salida se definen los conjuntos de entrada y se desarrollan las 5 funciones de pertenencia que se muestran en la Tabla 1. De forma similar se forman los 5 conjuntos de salida respectivos, que se aprecian en la Fig. 2.

Tabla 1: Conjuntos difusos de entrada y salida.

	Nombre	Descripción	Intervalo
Conjuntos de entrada	ENA	Error negativo alto	-200 to -110
	ENB	Error negativo bajo	-145 to 0
	EN	Error neutral	-70 to 70
	EPB	Error positivo bajo	0 to 145
	EPA	Error positivo alto	110 to 200
Conjuntos de salida	ANA	Acción negativa alta	-5 to -2,75
	ANB	Acción negativa baja	-3.625 to 0
	AN	Acción neutral	-1.75 to 1.75
	APB	Acción positiva baja	0 to 3.625
	APA	Acción positive alta	2.75 to 5

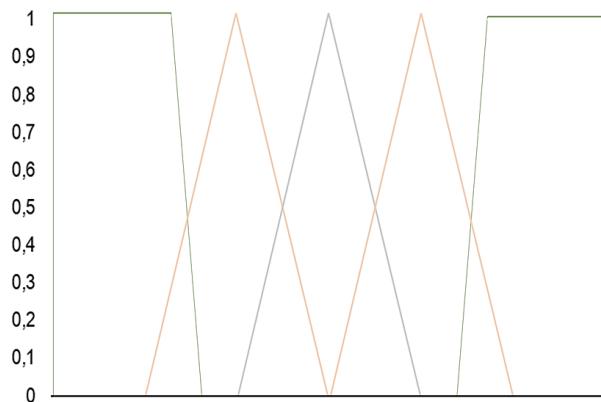


Fig. 2. Conjuntos borrosos de entrada de la variable lingüística.

Como controlador se utilizó la tarjeta embebida Arduino, la cual se basa en el microcontrolador ATmega328P. Un dispositivo robusto y de muy bajo costo, que es la más usada de esta familia de tarjetas. Posee 14 pines de entrada/salida, donde 6 son entradas analógicas, también posee conexión USB, alimentación externa y conexión a un sinnúmero de componentes según el proyecto que se realice. Tiene un entorno de desarrollo (IDE) propio, el cual utiliza programación estándar basado en C++ y un firmware que se ejecuta en ésta.

2.5.3. Comunicación OPC entre Arduino y HMI

En la Fig. 3 se detalla el diagrama de bloques, que explica la estructura de comunicación entre Arduino y el HMI.

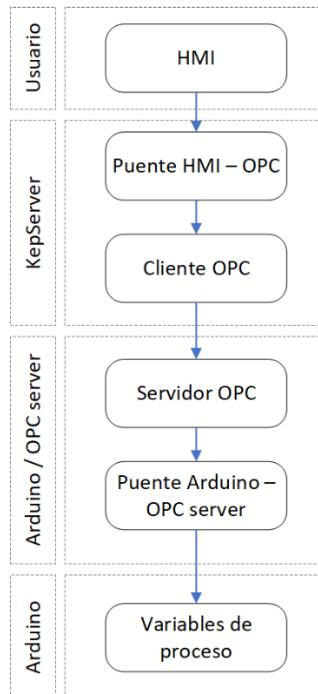


Fig. 3. Diagrama de bloques de la comunicación entre Arduino y el HMI.

Arduino ofrece la posibilidad de establecer una comunicación con el HMI mediante un servidor OPC. Para su configuración previamente se necesita descargar la librería OPC, mediante el "Gestor de Librerías" del IDE de Arduino y el programa gratuito "Arduino OPC Server". Éste está disponible enlace: <https://www.st4makers.com/download-opc-server-for-arduino>. El servidor OPC de Arduino sirve de puerta de enlace entre el IDE de Arduino y el software KepServer Ex 5 que hace las veces de cliente OPC [11].

2.5.4. Instalación y configuración de Arduino OPC Server 1.9

Antes de iniciar con la instalación del servidor OPC de Arduino es indispensable instalar los componentes principales de OPC, los cuales están disponibles en: <https://opcfoundation.org/developertools/developer-kits-classic/core-components>. Para acceder a la descarga es necesario crear un usuario y contraseña con fines de verificación de la página. A continuación, seguir estos pasos:

- Descomprima y ejecute el archivo ArduinoOPCServer.exe. Luego de ejecutarse el archivo generará dos archivos nuevos.
- Los archivos que se crean sirven para registrar el servidor en el sistema operativo, luego configurar el servidor dirigiéndose a la pestaña "Configuration". Ahí seleccionar el puerto serial, la velocidad de comunicación y el intervalo de lectura.
- Salvar la configuración y ejecutar como administrador el archivo "register", para registrar en el sistema operativo los cambios que se realizaron en la comunicación. Estos pasos se realizan una sola vez o cuando los parámetros de comunicación sean cambiados.
- Ejecutar el IDE de Arduino y seleccione la pestaña "Programa", en esta opción elija "Incluir Librería" y luego "Gestionar Librerías". En la ventana que se despliega dirigirse a la barra de búsqueda y escribir OPC para localizar la librería necesaria; seleccionar la última versión e instalar.

2.5.5. Configuración del cliente OPC en el software KEPServerEx 5

En el software KEPServerEx 5 se configura el canal y dispositivo que permita enviar los valores de las variables de proceso del control realizado en Arduino y así visualizarlas en LabVIEW.

- a) Creación del Canal del cliente OPC
 - Crear un nuevo canal y darle un nombre para identificarlo fácilmente.

- Seleccionar el controlador del dispositivo. En este caso el controlador a elegir es OPC DA Client, dar clic en siguiente hasta llegar a la ventana de selección del servidor OPC.
 - En la ventana del wizard de ayuda seleccionar el servidor OPC con el cual va a conectarse, como se trata de una comunicación local se despliega la pestaña Local Machine y escoger ArduinoOPCServer.1.
 - Avanzar en las ventanas de ayuda del wizard (no es necesario modificar los parámetros) hasta finalizar la creación del canal.
- b) Creación del Dispositivo OPC y los tags de comunicación
- Crear un nuevo dispositivo en el canal que se creó anteriormente.
 - Clic en siguiente hasta llegar a la ventana de importar ítems, cabe mencionar que en las ventanas anteriores no es necesario modificar ningún parámetro para obtener una buena comunicación.
 - Importar los ítems que deben estar previamente compilados y cargados a la tarjeta Arduino para ser reconocidos por el software. Añadir uno a uno los tags que representan a las variables de proceso.
 - Verificar que la calidad de comunicación sea buena [11].

3. Resultados

3.1. Simulación

En la Fig. 4 se presenta la simulación de la respuesta del controlador en la estación mencionada. Se realiza en el software Simulink, donde se aprecia que la variable de procesos sigue a la señal de control establecida, como se esperaba.

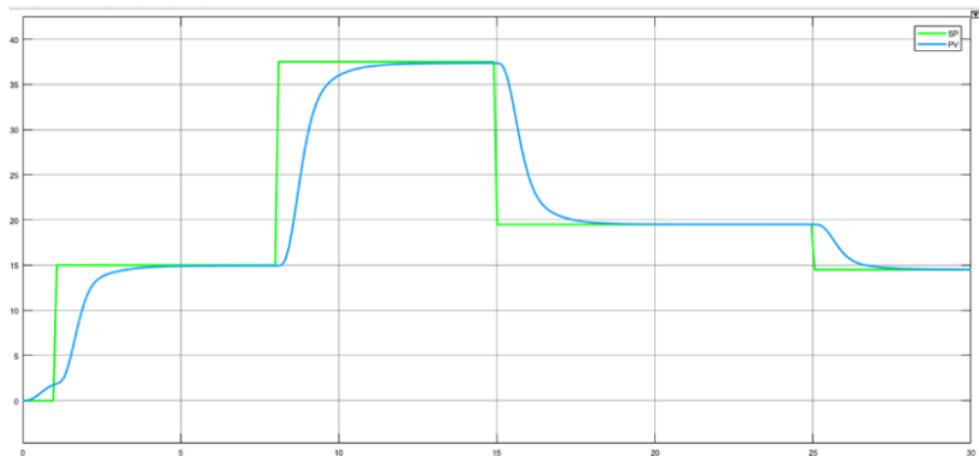


Fig. 4. Resultados de simulación del controlador.

3.2. Pruebas experimentales

A continuación, se presenta el análisis de las curvas de respuesta que producen las variables del proceso, al implementar el algoritmo de control difuso. Este experimento inicia con el SP en 0 PSI y posteriormente va incrementando 60, 40, 20, 100 y 40 PSI cada 15 segundos respectivamente. En el eje vertical se presentan los valores de presión, mientras que en el eje horizontal está el tiempo. Como se puede observar en la Fig. 5 el valor del PV sigue al SP con poco sobreimpulso negativo en el cambio de 100 a 20.

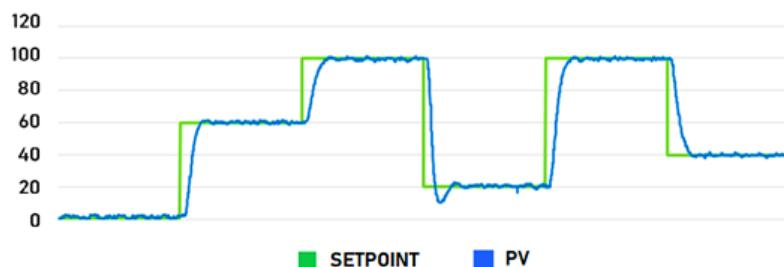


Fig. 5. Curvas de respuesta de la señal ante distintos cambios de SP.

En la tabla se describen los valores característicos temporales y de sobreoscilación del sistema ante la excitación de un escalón unitario, como producto del cambio del valor del SP de 0 a 80 PSI. El rango de variación del SP es igual a 80 PSI, por lo que, el tiempo de asentamiento (Ts) se determina cuando la curva de respuesta alcanza un rango igual o menor al 5% alrededor del SP. En este caso el rango será $80 \pm 5\%$, es decir entre 76 y 84 PSI. El tiempo de subida (Tr) se determina desde que la curva de respuesta está al 10% hasta que alcanza el 90%, es decir desde 8 hasta 72 PSI. El tiempo muerto (Tm) es el intervalo desde que se cambia la consigna y el controlador reacciona, mientras que el porcentaje de sobreimpulso (%M) es la cantidad de variación de la PV con respecto al SP, cuando éste varía.

Tabla 2: Resumen de los valores temporales y de sobreoscilación del sistema.

Tm	Tr	Ts	%M
3.16 s	7.64 s	12.6 s	4.21%

4. Discusión

El sector industrial necesita de profesionales que estén capacitados, en este caso particular que los ingenieros dominen la teoría de control. En esta aplicación se desarrolló un controlador de bajo costo que puede ser usado por los estudiantes de una institución de educación superior para reforzar su aprendizaje teórico. Con este prototipo los alumnos pueden variar los conjuntos de entrada y de salida y ver la respuesta del sistema tanto en simulación como su implementación real. Para comprobar su correcto funcionamiento de diseño un algoritmo de control con cinco funciones de membresía que ofrece muy buenos resultados.

De igual manera se comprueba que tarjetas de muy bajo costo pueden ser usadas para el control de elementos semi-industriales. La tarjeta Arduino Uno es la más económica de su familia, sin embargo, tiene buenas prestaciones, lo cual ya ha sido comprobado en otras aplicaciones como [12], [13]. Dentro del algoritmo desarrollado se tuvieron tiempos bajos de respuesta y un porcentaje reducido de sobreimpulso. En la Fig. 5 al realizar una reducción brusca del valor de SP de 100 a 20 PSI se percibe un sobreimpulso negativo considerable. Un resultado que dado el alto rango de variación de la consigna y las limitadas características técnicas de esta tarjeta son justificados, sin reducir su validez.

Como principal limitación se tienen las características propias de la tarjeta, pero que para esta aplicación son suficientes. También se destaca la necesidad de un acondicionamiento de señales a la entrada y salida de las señales, lo cual con un PLC no sería necesario. Finalmente, el uso de una estación de uso estudiantil, podría tener un comportamiento distinto a un proceso real a pesar de la existencia de elementos industriales como válvulas, tuberías y tanques.

Como trabajo futuro se motiva a otros investigadores a seguir probando la validez de este tipo de tarjetas embebidas en otros procesos. También se podría comparar con el desempeño de un PLC, lo cual daría mayor información sobre su uso en las industrias.

Financiamiento

Esta investigación ha sido financiada en su totalidad por los autores.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de Consentimiento Informado

No aplica.

Conflictos de Interés

Los autores declaran no tener un conflicto de interés.

Referencias

- [1] P. A. Buele, F. Avilés-Castillo, y J. Buele, "Repercusiones en la Salud Mental de los Estudiantes de Tercero de Bachillerato: Un Caso de Estudio", *Publicare*, vol. 1, núm. 1, pp. 26–30, nov. 2021. doi: [10.56931/pb.2021.11_5](https://doi.org/10.56931/pb.2021.11_5)
- [2] J. Buele *et al.*, "Interactive system for monitoring and control of a flow station using labVIEW", en *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, vol. 721, pp. 583–592. doi: [10.1007/978-3-319-73450-7_55](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73450-7_55).
- [3] P. Parikh, S. Sheth, R. Vasani, y J. K. Gohil, "Implementing Fuzzy Logic Controller and PID Controller to a DC Encoder Motor - 'a case of an Automated Guided Vehicle'", *Procedia Manuf.*, vol. 20, pp. 219–226, ene. 2018, doi: [10.1016/j.promfg.2018.02.032](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.032).
- [4] D. M. Taghoy y J. F. Villaverde, "A Fuzzy Logic Approach for the Determination of Cavendish Banana Shelf Life", en *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON*, feb. 2019, vol. 2018-Octob, pp. 2467–2472. doi: [10.1109/TENCON.2018.8650454](https://doi.org/10.1109/TENCON.2018.8650454).
- [5] T. Mantoro y W. Istiono, "Saving water with water level detection in a smart home bathtub using ultrasonic sensor and Fuzzy logic", en *Proceedings of the 2nd International Conference on Informatics and Computing, ICIC 2017*, feb. 2018, vol. 2018-Janua, pp. 1–5. doi: [10.1109/IAC.2017.8280602](https://doi.org/10.1109/IAC.2017.8280602).
- [6] V. J. Davidson, "Fuzzy Control for Food Processes", *Comput. Control Syst. Food Ind.*, pp. 179–205, feb. 2018, doi: [10.1201/9781315140100-6](https://doi.org/10.1201/9781315140100-6).
- [7] R. Rodriguez Serrezuela, J. Luis Aroca Trujillo, R. Sagaro Zamora, y V. Azhmyakov, "Start-Up of a PID Fuzzy Logic-Embedded Control System for the Speed of a DC Motor Using LabVIEW", en *Electric Machines for Smart Grids Applications - Design, Simulation and Control*, IntechOpen, 2018. doi: [10.5772/intechopen.76364](https://doi.org/10.5772/intechopen.76364).
- [8] Á. Odry, R. Fullér, I. J. Rudas, y P. Odry, "Fuzzy control of self-balancing robots: A control laboratory project", *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 28, núm. 3, pp. 512–535, may 2020, doi: [10.1002/cae.22219](https://doi.org/10.1002/cae.22219).
- [9] A. V. Buzikayeva, V. I. Susdorf, y S. P. Cherniy, "Modeling multi-cascade fuzzy controller with integrated implementation of various control laws", en *Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019*, oct. 2019, pp. 45–48. doi: [10.1109/URALCON.2019.8877652](https://doi.org/10.1109/URALCON.2019.8877652).
- [10] J. Buele, P. Ríos-Cando, G. Brito, R. Moreno-P, y F. W. Salazar, "Temperature Controller Using the Takagi-Sugeno-Kang Fuzzy Inference System for an Industrial Heat Treatment Furnace", en *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 12254, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2020, pp. 351–366. doi: [10.1007/978-3-030-58817-5_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58817-5_27).
- [11] M. Pilatásig *et al.*, "Implementation of fuzzy controller in low cost embedded boards for a flow system", en *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON 2017 - Proceedings*, dic. 2017, vol. 2017-Janua, pp. 1–7. doi: [10.1109/CHILECON.2017.8229642](https://doi.org/10.1109/CHILECON.2017.8229642).
- [12] N. H. Harani, A. S. Sadiah, y A. Nurbasari, "Smart Fish Feeder Using Arduino Uno with Fuzzy Logic Controller", abr. 2019. doi: [10.1109/ICCED46541.2019.9161114](https://doi.org/10.1109/ICCED46541.2019.9161114).
- [13] B. Sugiarto, S. Riyadi, R. H. Laluma, Gunawansyah, Gunawan, y R. N. Sukmana, "The Implementation of Fuzzy Logic for Fire Extinguishing Robot Based on Arduino Uno", 2021. doi: [10.1109/TSSA52866.2021.9768240](https://doi.org/10.1109/TSSA52866.2021.9768240).