

Sintonía de Controladores Inteligentes Mediante Estrategia Híbrida Fuzzy-PSO

Miguel A. Azar; Sergio L. Martínez; Enrique E. Tarifa
Samuel Franco Domínguez; Jorge J. Gutiérrez

Facultad de Ingeniería / Universidad Nacional de Jujuy / CONICET
Ítalo Palanca N° 10 / S. S. de Jujuy / Provincia de Jujuy / Tel. 0388-4221591
maazar@fi.unju.edu.ar; smartinez@fi.unju.edu.ar; eetarifa@fi.unju.edu.ar
sfrancodominguez@gmail.com; jorgejgutierrez@outlook.com

Resumen

El presente trabajo se desarrolla en el contexto del proyecto de investigación denominado “Diseño y Simulación de Controladores Inteligentes Aplicados a Procesos Industriales”. El trabajo está orientado en la aplicación de técnicas no convencionales para el ajuste y sintonía de los controladores inteligentes, implementando la técnica de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) en tándem, sobre un controlador de lógica fuzzy cuyos parámetros son convenientemente modificados por el algoritmo PSO.

En el diseño de controladores convencionales aplicados a procesos productivos o industriales, existe una serie de técnicas para lograr la sintonía adecuada. Por otra parte, el desarrollo de controladores inteligentes requiere significativos esfuerzos de investigación interdisciplinarios para integrar conceptos y métodos de áreas tales como control, identificación, estimación, además de otras áreas tales como teoría de la comunicación, ciencias de la computación, inteligencia artificial e investigación operativa. Debido a su estructura particular, el ajuste o sintonía de sistemas controladores no convencionales, basados en inteligencia artificial, puede realizarse mediante la modificación de los parámetros intrínsecos del controlador.

Palabras clave: Controladores inteligentes, sintonización, lógica fuzzy, procesos industriales, PSO.

Contexto

El trabajo de ajuste de controladores inteligentes mediante Fuzzy-PSO que se describe, se encuentra enmarcado en el proyecto “Diseño y Simulación de Controladores Inteligentes Aplicados a Procesos Industriales” que está orientado al desarrollo general de sistemas de apoyo para la toma de decisiones en procesos industriales, está enfocado específicamente al estudio, optimización e implementación de controladores inteligentes aplicados a modelos de equipos y procesos industriales característicos de la región.

Se desarrolla en el ámbito de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jujuy (UNJu) bajo la dirección del Mg. Ing. Sergio L. Martínez, en un entorno multidisciplinario, con el aporte de las cátedras de Inteligencia Artificial (carrera de Ingeniería Informática), Ingeniería de Procesos y Modelo y Simulación (carrera de Ingeniería Química). El proyecto se compone con los siguientes integrantes: Codirector Ing. Samuel Franco Domínguez; Asesor Dr. Enrique E. Tarifa; Docente Investigador Ing. Miguel A. Azar; Docente Investigador Ing. Jorge J. Gutierrez.

Está financiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica y Estudios Regionales (SeCTER) de la Universidad Nacional de Jujuy (UNJu) y se identifica con el código interno D/0133.

Este proyecto forma parte del Programa de Investigación “Desarrollo de Sistemas de Soporte a la Toma de Decisiones” (dirigido por el Dr. Enrique Tarifa y codirigido por el Mg. Ing. Sergio L. Martínez) y está incorporado al Programa de Incentivos –Cód. 08/D134– dependiente de la Secretaría de Políticas Universitarias (SPU) del Ministerio de Educación de la Nación.

Introducción

El ámbito industrial emplea procesos manuales, semiautomáticos y automáticos. Casi todos estos procesos incorporan controladores o se asisten con subsistemas de control; en forma simplificada y según el tipo de controlador que se trate, cuentan con una variable de referencia (*set point*), un proceso de comparación y la toma de una decisión a través de una acción. En el caso de los controladores automáticos, aún frente a los grandes avances de la ingeniería de control, el uso de los clásicos PID se emplea en casi todos los ámbitos de la industria (Khodabakhshian y Edrisi, 2008).

Existe un amplio campo de desarrollo y aplicación que tienen los controladores convencionales que, usualmente basados en modelos, realizan un manejo estrictamente matemático de las variables de control. Frente a ello, los controladores basados en inteligencia artificial, con un amplísimo campo de investigación y desarrollo, tienden a marcar una actividad superadora frente a los primeros, principalmente por presentar estructuras más simples con la factibilidad de aplicar variables de control simbólicas, sencillas y naturales.

Estado del Arte

Entre los métodos más antiguos y relevantes para la sintonización de sistemas de control convencionales, tanto a lazo abierto y especialmente a lazo cerrado, se destacan los trabajos clásicos de Ziegler y Nichols (1942), Cohen y Coon (1953), Lopez *et al.* (1967), Kaya y Sheib (1988), Sung *et al.* (1996), entre otros de gran importancia.

La sintonización de sistemas de control inteligentes, y más específicamente aquellos basados en lógica fuzzy (Zadeh, 1965, 1978, 1994), se realiza mediante diversas configuraciones en las que se modifican parámetros intrínsecos tales como las funciones de pertenencia del sistema de control fuzzy y las ganancias intervinientes, entre otros.

Para este tipo de controladores, el proceso de sintonía se basa en la modificación de la forma y posición de las funciones internas de controlador FLC (*Fuzzy Logic Controller*). Para ello, la técnica PSO –optimización por enjambre de partículas– (Kenedy *et al.*, 1995) es un enfoque ideal como proceso de optimización.

Las alternativas de solución para una sintonía Fuzzy-PSO plantean esquemas estructurales que conviene citar. Uno de ellos es el abordaje que desarrolla Bouallègue *et al.* (2012), donde el diseño del controlador fuzzy es formulado como un problema de optimización con restricciones que es eficientemente resuelto por el algoritmo PSO.

Otras alternativas se reflejan en los trabajos de Welch *et al.* (2010), Permana *et al.* (2010), Talbi *et al.* (2011), Liu *et al.* (2007), Das y Ghosh (2013), Gharghory y Kamal (2013), Turanoglu *et al.* (2011) y Kumar y Sathavara (2015), en donde el algoritmo PSO modifica los parámetros de las funciones de pertenencia del controlador hasta encontrar el mínimo error

de estado estacionario (SSE). Una variante a este caso la describen Letting *et al.* (2010) y Rahmani *et al.* (2012), donde el objetivo es minimizar los principales parámetros del controlador tales como el tiempo de crecimiento (*rising time*), tiempo de ingreso y permanencia en la banda de error (*settling time*), sobrepico (*overshoot*) y error de estado estacionario (*steady state error*).

El planteo de modificar únicamente las ganancias de un controlador FLC es otra de las variantes que presenta Obaid *et al.* (2011) en su trabajo de diseño óptimo de un controlador FLC tipo PID. Este esquema también es el planteado por Ahmed *et al.* (2014), Hurel *et al.* (2012) y Ghoshal (2004).

El control a través de la optimización de la base de reglas del sistema fuzzy propuesto por Zhang *et al.* (2010) es otro caso en donde se aplican diferentes pesos a las reglas obteniendo resultados muy satisfactorios con respecto al sistema fuzzy sin pesos y a un sistema híbrido aplicando algoritmos genéticos (AG-Fuzzy). Bajo este esquema también Debnath *et al.* (2013) no solo actúa sobre la base de reglas sino también en forma simultánea aplica la optimización sobre las funciones de pertenencia.

Shayeghi *et al.* (2008; 2010) propone una estrategia en la que la optimización se aplica sobre los bloques de proporcionalidad, integral y diferencial.

La sintonización también es posible ajustando los parámetros de la función transferencia según expresa Al Gizi *et al.* (2012) en su trabajo *Improve Fuzzy-PSO PID Controller by Adjusting Transfer Function Parameters*, pero este enfoque es altamente cuestionable debido a que un sistema controlado (planta) posee características intrínsecas que no pueden ser alteradas en la práctica.

Líneas de Investigación, Desarrollo e Innovación

Del análisis de los diferentes trabajos y desarrollos relacionados con el proceso de sintonización de sistemas de control inteligentes, así como las diferentes pruebas realizadas aplicando el algoritmo PSO híbrido, se establece un procedimiento general de diseño de controladores fuzzy. Los pasos que se indican, según la profundidad y alcance con que sean considerados, pueden representar en sí mismos líneas complementarias de investigación:

- 1. Estudio de las estructuras de control:** esto incluye sistemas de lazo abierto/cerrado, respuestas ante impulso/escalón y modelado (Ogata, 2010; Jantzen, 2007).
- 2. Obtención de funciones de transferencia:** implica encontrar aquella función, dentro del campo de Laplace, que modele el comportamiento de la planta a controlar (Ogata, 2010; Love, 2007).
- 3. Determinación de las magnitudes de entrada/salida:** esto es, ponderar el alcance de las variables fuzzy que controlarán la planta de acuerdo a sus características operativas (Kavacic y Bogdan, 2006; Tanaka y Wang, 2001).
- 4. Diseño del algoritmo de optimización:** consiste en definir que variables serán candidatas a modificar para el ajuste para posteriormente codificar el sistema híbrido (Kumar y Sathavara, 2015; Gharghory y Kamal, 2013).
- 5. Pruebas de laboratorio y mediciones:** contrastar los resultados con casos reales factibles de ser medidos, como por ejemplo el control de motores de corriente continua o alterna.

En cuanto al desarrollo e innovación, el trabajo está orientado a modificar la técnica híbrida para un ajuste en tiempo real, dado que una planta (o sistema controlado)

puede resultar más compleja e incluso imposible de modelar con precisión. Es en estos casos que la sintonización requiere de un proceso dinámico y por lo tanto el modelado de la planta puede hacer uso de otras técnicas alternativas a las convencionales de forma analítica. Un caso de estas características se refleja en el trabajo de Azar *et al.* (2013), en donde se recurre a un modelado de planta bajo un esquema fuzzy.

Objetivos y Resultados

El proyecto de referencia propone como objetivo general *diseñar, sintonizar e implementar mediante simulación, sistemas de control inteligentes aplicados a modelos de procesos industriales enfocados hacia procesos productivos o tecnológicos de la región*, y se complementa con objetivos específicos que se detallan a continuación:

- Estudiar y modelar procesos industriales clásicos utilizados en procesos productivos.
- Desarrollar sistemas de control inteligentes basados en diversas tecnologías de inteligencia artificial.
- Aplicar procedimientos específicos para la generación de datos requeribles en el aprendizaje y configuración de sistemas de control inteligentes.
- Comparar y determinar las ventajas e inconvenientes que ofrecen los sistemas de control inteligentes frente a los sistemas clásicos de control.
- Investigar y aplicar nuevos métodos algorítmicos para mejorar la adaptabilidad de los sistemas de control inteligentes a los esquemas de procesos industriales modelados.

Respecto del trabajo que aquí se presenta, y de acuerdo a las primeras versiones aplicadas para un controlador basado en el algoritmo PSO-Fuzzy, se obtuvieron los siguientes resultados preliminares, utilizando como sistema controlado testi-

go, el modelo de un motor de corriente continua:

- El sistema de control, cuando es sometido a una perturbación de tipo escalón, responde a través de una curva amortiguada. Tal perturbación puede generarse, en el caso de un motor de corriente continua, mediante una carga agregada en forma brusca cuando el motor se encuentra en vacío y a velocidad nominal.
- La función objetivo a minimizar fue evaluada para las variables más sensibles del sistema de control al que se le aplica un escalón. Las variables seleccionadas fueron: tiempo de crecimiento (*rise time*), tiempo de ingreso y permanencia en la banda de error (*settling time*) y sobrepico (*overshoot*), para la función objetivo *FO* siguiente:

$$FO = RiseTime + SettlingTime + Overshoot$$

- El algoritmo PSO genera partículas aleatorias que se mueven dentro de un rango muy acotado. Cada partícula puede incursionar en el rango definido para cada partición de las funciones de pertenencia del controlador fuzzy.
- En este caso, las partículas del algoritmo PSO se mueven en un espacio multidimensional que es desconocido pero que es medible en forma indirecta a través de las variables mencionadas anteriormente.

Las primeras aplicaciones del algoritmo PSO-Fuzzy para sintonizar controladores FLC arrojaron resultados muy prometedores, pero el proceso de investigación continúa. Actualmente se trabaja con variantes de la estrategia ABC (algoritmo de colonia de abejas) para buscar las mejores propiedades en el proceso de sintonía y optimización de los sistemas, que luego serán aplicados a procesos industriales característicos de esta región.

Formación de Recursos Humanos

En los dos años de ejecución del proyecto se obtuvieron resultados que dieron lugar a trabajos presentados en congresos y publicaciones en revistas científicas. Además, se desarrollaron modelos matemáticos de procesos industriales, controlados con distintos tipos de sistemas, tanto convencionales como inteligentes.

Becas de Investigación

- Cristian David Yurquina, estudiante de Ingeniería Química de la UNJu, con beca de Estímulo a las Vocaciones Científicas, CIN, 2014-2015. Título del plan de trabajo “Control Inteligente para piletas de concentración de una planta procesadora de litio”. Director: Mg. Ing. Sergio L. Martínez, Codirector: Ing. Álvaro F. Nuñez.
- Lautaro Acosta, estudiante de Ingeniería Química de la UNJu, con beca de Estímulo a las Vocaciones Científicas, CIN, 2015-2016. Título del plan de trabajo “Modelado y control inteligente de un proceso de concentración de Litio mediante pozas solares”. Director: Mg. Ing. Sergio Luis Martínez, Codirector: Ing. Álvaro F. Nuñez.

Formación de Investigadores

- Ing. Miguel A. Azar, Facultad de Ingeniería, UNJu. Integrante del proyecto “Diseño y Simulación de Controladores Inteligentes Aplicados a Procesos Industriales” en carácter de Docente Investigador.
- Ing. Jorge J. Gutierrez, Facultad de Ingeniería, UNJu. Integrante del proyecto “Diseño y Simulación de Controladores Inteligentes Aplicados a Procesos Industriales” en carácter de Docente Investigador.

Referencias

- Ahmad A.H. and Sultan N.S., “Design and Implementation of Controlled Zeta Converter Power Supply”, American Journal of Electrical and Electronic Engineering, V.2(3), pp. 121-128. 2014.
- Al Gizi A.J.H. and Mustafa M.W., “Improve Fuzzy-PSO PID Controller by Adjusting Transfer Function Parameters”, International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 2, Issue 11, ISSN 2250-3153. 2012.
- Azar M.A., Martínez S.L. y Manero J., “Modelado con lógica fuzzy de sistema controlado con función transferencia desconocida: un caso de estudio”, IX Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA, ISSN 1853-7871. 2013.
- Bouallègue S., Haggège J. and Benrejeb M., “A New Method for Tuning PID-Type Fuzzy Controllers Using Particle Swarm Optimization”, Fuzzy Controllers – Recent Advances in Theory and Applications. ISBN 978-953-51-0759-0. 2012.
- Cohen, G.H. and Coon, G.A., “Theoretical Considerations of retarded Control”, ASME Transactions (EUA), Vol. 75, pp. 827 – 834, 1953.
- Das, D. and Ghosh A., “Algorithm for a PSO Tuned Fuzzy Controller of a DC Motor”, International Journal of Computer Applications, Vol. 73, N° 4, 2013.
- Debnath S.B.C., Shill P.C. and Murase K., “Particle Swarm Optimization Based Adaptive Strategy for Tuning of Fuzzy Logic Controller”, International Journal of Artificial Intelligence & Applications (IJAIA), Vol.4, No.1, 2013.
- Gharghory S. and Kamal H., “Modified PSO for Optimal Tuning of Fuzzy PID Controller”, IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 10, Issue 2, No 1, 2013.
- Ghoshal S.P., “Optimizations of PID gains by particle swarm optimizations in fuzzy based automatic generation con-

- trol”, Electric Power Systems Research, Elsevier, 72 pp. 203–212. 2004.
- Hurel J., Mandow A. and Garcia-Cerezo A., “Tuning a fuzzy controller by particle swarm optimization for an active Suspension System”, ECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 25-28, 2012.
- Jantzen J., "Foundations of Fuzzy Control", John Wiley & Sons Ltd, ISBN: 0-470-02963-3, England, 2007.
- Kaya, A. y Sheib T.J., “Tuning of PID Controllers of Different Structures”, Control Engineering (EUA), pp. 62–65, 1988.
- Kennedy J. and Eberhart R., “Particle swarm optimization,” Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, pp. 1942–1948. Vol. 4, 1995.
- Khodabakhshian and M. Edrisi, “A New Robust PID Load Frequency Controller”, Control Engineering Practice, Vol. 16, pp. 1069-1080, 2008.
- Kovacic Z., Bogdan S., "Fuzzy Controller Design, Theory and Applications", ISBN 978-0-8493-3747-5, CRC Press, Boca Raton, 2006.
- Kumar M.H. and Sathavara M.J., “Comparisons of Speed Control of DC Motor Using PID-PSO and Fuzzy-PSO Techniques”, International Journal For Technological Research In Engineering Vol. 2, Issue 9, ISSN (Online): 2347–4718, 2015.
- Letting L.K., Munda J.L. and Hamam A., “Particle Swarm Optimized T-S Fuzzy Logic Controller for Maximum Power Point Tracking in a Photovoltaic System”, in IPEC, 2010 Conference Proceedings, pp. 89–94, 2010.
- Liu H., Abraham A. and Zhang W., “A fuzzy adaptive turbulent particle swarm optimization”, Int. J. Innovative Computing and Applications, Vol. 1, No. 1. 2007.
- López, A.M., Miller J.A., Smith C.L. and Murril P.W., “Tuning Controllers with Error-Integral Criteria”, Instrumentation Technology (EUA), 1967.
- Love J., "Process Automation Handbook", Springer-Verlag London Limited, ISBN 978-1-84628-281-2, England, 2007.
- Obaid Z.A., Salman S.A.A., Ali H.I., Sulaiman N., Marhaban M.H. and Hamidon M.N., “Design of PSO-Based Optimal Tunable PID Fuzzy Logic Controller Using FPGA”, A Ubiquitous Tool for the Practical Engineer, Prof. Clara Ionescu (Ed.), ISBN: 978-953-307-907-3, InTech, 2011.
- Ogata K., “Ingeniería de Control Moderna”, Prentice Hall, Hispanoamericana S.A. Minnesota, USA. 2010.
- Permana K.E. and Hashim S.Z.M., “Fuzzy Membership Function Generation using Particle Swarm Optimization”, Int. J. Open Problems Compt. Math., Vol. 3, No. 1, ISSN 1998-6262, 2010.
- Rahmani R., Mahmodian M.S., Mekhilef S. and Shojaei A.A., "Fuzzy logic controller optimized by particle swarm optimization for DC motor speed control". IEEE Student Conference on Research and Development. pp. 109-113. 2012.
- Shayeghi H., Jalili A. and Shayanfar H.A., “Multi-stage fuzzy load frequency control using PSO”, Energy Conversion and Management 49 pp. 2570–2580. 2008.
- Shayeghi H. and Shayanfar H.A., “PSO Based Neuro-Fuzzy Controller for LFC Design Including Communication Time Delays”, International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE), Iss. 3, Vol. 2, No. 2, Jun. 2010.
- Sung, S.W., O J., Lee I.B., Lee J. and Yy S.H., “Automatic Tuning of PID Controller using Second-Order plus Time delay Model”, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 29 N° 6, pp. 990– 999, Japan, 1996.
- Talbi N. and Belarbi K., “Fast Hybrid PSO and Tabu Search Approach for Optimization of a Fuzzy Controller”, IJCSI International Journal of Computer Sci-

- ence Issues, Vol. 8, Issue 5, No 2, ISSN (Online): 1694-0814, 2011.
- Tanaka K., Wang H., "Fuzzy control systems, design and analysis", John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.
- Turanoglu E., Ozceylan E. and Kiran M.S., "Particle Swarm Optimization and Artificial Bee Colony Approaches to Optimize of Single Input-Output Fuzzy Membership Functions", Proceedings of the 41st International Conference on Computers & Industrial Engineering, pp. 542-547, 2011.
- Welch R.L. and Venayagamoorthy G.K., "Energy dispatch fuzzy controller for a grid-independent photovoltaic system", Energy Convers Manage, 51:928–937. 2010.
- Zadeh L., "Fuzzy sets as a basis for theory of possibility", Fuzzy Sets and Systems, vol. 1, pp. 3–28, 1978.
- Zadeh L., "Fuzzy sets," Information Control, vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- Zadeh, L., "Soft computing and fuzzy logic", IEEE Software, 11(6), pp. 48-56. 1994.
- Zhang L., Gao L., Shao X., Wen L. and Zhi J., "A PSO-Fuzzy group decision-making support system in vehicle performance evaluation", doi:10.1016 / j.mcm.2010.03.042. 2010.
- Ziegler, J.B. and N.B. Nichols; Optimum Settings for Automatic Controls, ASME Transactions (EUA), Vol. 64, pp. 759-768, 1942.