



A. PROPUESTA PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

1. TIPO DE PROYECTO:

Interno	X	Grupal	
Semilla		Multidisciplinario	

2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Básica		Aplicada	X
--------	--	----------	---

3. UNIDAD EJECUTORA

1. Departamento de Automatización y Control Industrial

4. LINEA(S) DE INVESTIGACIÓN:

1. Control y Sistemas (DACI-A3-L2)

5. TÍTULO DEL PROYECTO:

**CONTROL INTELIGENTE DE PROCESOS QUÍMICOS UTILIZANDO
SIMULACIONES HARDWARE-IN-THE-LOOP**

6. RESUMEN

Los procesos en la industria están compuestos por un conjunto de etapas interconectadas que permiten la conversión de materias primas en un producto final, esto involucra el manejo de un sin número de variables de entrada/salida. Además, los procesos químicos en la industria incluidas las columnas de destilación de alta pureza, los reactores químicos altamente exotérmicos, sistemas con intercambiadores de calor, entre otros, son intrínsecamente no lineales. Estas no linealidades presentes en el comportamiento dinámico de los procesos químicos que juntamente con el manejo de una gran cantidad de datos los ha convertido en sistemas cada vez más complejos, por lo cual se han vuelto inabordables por estrategias de control convencionales. Por otro lado, las técnicas de control basadas en inteligencia artificial han demostrado ser capaces de manejar las incertidumbres en los procesos industriales de manera eficiente, así como también de poseer una gran capacidad de manejo y análisis de grandes cantidades de datos, entre otros.

Además, muchos centros de investigación y educativos no cuentan con los recursos económicos necesarios para adquirir equipos presentes a nivel industrial lo cual limita el desarrollo de nuevas estrategias de control que mejoren la eficiencia de los procesos industriales, siendo necesario encontrar nuevas herramientas y tecnologías que permitan resolver esta problemática. Es así como los esquemas de control basados en simulación Hardware-in-the-loop han demostrado ser un elemento de eficacia sobradamente probada en el desarrollo de sistemas de control basado en modelos simulados, siendo su implementación barata y flexible.

De esta manera en el presente proyecto se pretende desarrollar nuevas estrategias y/o esquemas de control inteligente, aplicado a procesos químicos utilizando simulaciones hardware-in-the-



loop sean capaces de abarcar todas estas problemáticas mencionadas de manera más eficiente y robusta.

7. PALABRAS CLAVE

Control Inteligente, Inteligencia Artificial, Hardware-In-the-Loop, Procesos Químicos.

8. OBJETIVOS

8.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar, desarrollar e implementar técnicas de Control basado en inteligencia artificial aplicado a procesos químicos utilizando simulaciones hardware-in-the-loop.

8.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Estudiar y seleccionar los procesos químicos más representativos a nivel de industrias como: petroquímica, farmacéutica, alimentaria, entre otras.
- b. Estudiar técnicas de control basadas en inteligencia artificial para aplicar a los procesos químicos seleccionados, dando énfasis a técnicas de modelamiento difuso, aprendizaje por redes neuronales, optimización utilizando algoritmos evolutivos y/o bio-inspirados, entre otras.
- c. Realizar una revisión bibliográfica de esquemas de control basados en simulaciones hardware-in-the-loop utilizando sistemas embebidos aplicados a procesos químicos.
- d. Desarrollar algoritmos basados en las técnicas de inteligencia artificial estudiadas para el modelamiento, la sintonización y el control de los procesos químicos seleccionados.
- e. Implementar los algoritmos de control inteligente desarrollados a los procesos químicos seleccionados utilizando simulaciones Hardware-in-the-loop (HIL) a través de sistemas embebidos.
- f. Publicar los resultados obtenidos mediante la realización de artículos científicos presentados en congresos y/o revistas de alto impacto.

9. HIPÓTESIS (opcional)

10. DETALLE DE LOS RESULTADOS ESPERADOS

- a. Al menos un proceso químico representativo estudiado y seleccionado
- b. Un estudio de las técnicas basadas en inteligencia artificial aplicadas a procesos químicos.
- c. Una revisión bibliográfica de esquemas de control basados en simulaciones hardware-in-the-loop aplicado a procesos químicos.
- d. Al menos un algoritmo de control desarrollado basado en inteligencia artificial aplicado a procesos químicos.
- e. Al menos un algoritmo de control inteligente implementado utilizando simulaciones Hardware-in-the-loop aplicado a procesos químicos.
- f. Al menos un artículo científico presentado en congresos y/o revistas de alto impacto.



11. IMPACTO DE LA INVESTIGACIÓN

Impacto Social

El control de procesos químicos constituye un campo de investigación muy importante para el Ecuador sobre todo porque estos procesos se encuentran presentes en la industria petroquímica. Al ser Ecuador un país petrolero y depender su economía de este es necesario obtener productos derivados del petróleo de mejor calidad cumpliendo con normas de seguridad y ambientales cada vez más exigentes. La mejora de estos procesos permitirá al país ser más competitivo en mercados internacionales mejorando los ingresos por este producto y a su mejorando la calidad de vida de sus habitantes.

Impacto Económico

El control inteligente de procesos en la industria ha tomado gran importancia, debido a la competitividad global, al rápido crecimiento económico y a las exigencias cada vez más rigurosas en normas ambientales y regulaciones de seguridad. Por otro lado, controlar de manera eficiente los procesos industriales presentan ventajas como: mejora en la calidad de los productos, reducción del consumo energético y uso eficiente de la energía, aumento en los niveles de seguridad, optimización de la materia prima minimizando la cantidad de materiales de desecho y aprovechamiento de este, reducción en la contaminación ambiental, entre otros.

Por otro lado, muchos centros de investigación y educativos del país no cuentan con los recursos económicos para adquirir equipamiento industrial muy común en industrias tales como la petroquímica, farmacéutica, alimentaria entre otras, lo cual limita a muchos investigadores y a los procesos de enseñanza-aprendizaje. Siendo necesario desarrollar nuevas herramientas y tecnologías innovadoras y creativas que permitan resolver esta problemática. Es así como simulaciones basadas en Hardware-In-the-Loop se ha convertido en una herramienta indispensable en muchas industrias actuales como la automovilística, aeroespacial, etc. Esto debido a la reducción de costo y flexibilidad que presenta esta tecnología.

En este sentido, este proyecto busca mejorar procesos productivos en ambientes industriales a través del control inteligente de procesos químicos mediante técnicas de inteligencia artificial utilizando herramientas y tecnologías baratas y flexibles.

Impacto Científico

El problema de control de procesos químicos es un área de gran interés y actualidad, esto debido a que se a nivel industrial se han desarrollado nuevas tecnologías para la producción de mejores productos donde aparecen columnas de destilación de alta pureza, reactores químicos altamente exotérmicos, sistemas con intercambiadores de calor, etc. Donde estos son cada vez más difíciles de controlar con esquemas convencionales. Además, la introducción de las tecnologías llamadas industria 4.0 va tomando más fuerza y siendo necesario el manejo de una gran cantidad de información para lo cual la inteligencia artificial ha demostrado ser una herramienta indispensable en este campo.

Por lo cual, existe un gran número de grupos de investigación en el mundo que realizan aportes en el tema. Donde el manejo de sistemas no lineales se encuentran los procesos químicos, y el manejo de una gran cantidad de información requiere desarrollar nuevas propuestas de control que permitan aumentar obtener mejores productos, y un aumento de la productividad de estos procesos.



12. ESTADO DEL ARTE, E INVESTIGACIONES PREVIAS DEL EQUIPO

Los procesos industriales actuales, son altamente integrados por ende cada vez más complejos y donde se requiere que los productos terminados sean de alta calidad y sus procesos cada vez más están sujetos a estrictas regulaciones ambientales y normas de seguridad (Ogunnaike & Ray, 1994). Las principales características de los procesos industriales según (Béla G. Lipták, 2006; Seborg, Thomas, & Duncan A, 2004) son: un manejo considerable de variables, son de naturaleza no-lineal debido a la presencia de procesos químicos, presentan retardos de tiempo, se encuentran sujetos a la presencia de incertidumbres, perturbaciones y además, presentan limitaciones físicas en los actuadores; las cuales pueden producir un grave deterioro en el rendimiento e incluso inestabilidad en el sistema de control si no son tomadas en cuenta para su diseño.

Los procesos químicos en la industria son tratados básicamente como sistemas multivariados con retardos, debido al manejo considerable de variables controladas y manipuladas en los procesos en la industria, los cuales se caracterizan por presentar acoplamiento entre variables apareciendo así cierto grado de interacción entre las mismas (Skogestad & Postlethwaite, 2001). Para resolver el problema de acoplamiento entre variables se han utilizado esquemas de control basados en desacopladores conjuntamente con IMC (Luan, et. al, 2017), basados en la medición del grado de interacción utilizando matriz de ganancias relativas (RGA) se diseñan desacopladores (Q. Jin, et. al, 2014). Otros enfoques utilizan esquemas centralizados de control (Abraham & Pappa, 2016). De esta manera, los procesos químicos en la industria requieren un manejo considerable de n variables de manipuladas y de m variables controladas siendo por lo general $n \neq m$, así, estos sistemas se los denomina no cuadrados lo cual dificulta aún más el diseño de controladores para sistemas multivariados con retardo, algunas propuestas basadas en compensadores de retardos por IMC (Chen, He, & Qi, 2011; Q. B. Jin, Hao, & Wang, 2013) y PS (Ammathil, Narsaiah, & Rao, 2014; Flesch, Santos, & Normey-Rico, 2012) para sistemas no cuadrados han sido desarrolladas.

Varias propuestas para el control de procesos químicos han sido estudiadas, algunas de estas se basan en control por modos deslizantes (SMC) (Camacho & Rojas, 2010; Camacho & Smith, 2000; Camacho, Smith, & Moreno, 2003; Cruz & Camacho, 2015), el cual es un esquema robusto de control, la misma que han sido ampliada para el control de sistemas con respuesta inversa (Asimbaya, et. al, 2017; Camacho, Rojas, & García, 1999), también para sistemas con elevado retardo (O. Camacho, 2017), (Camacho, Rojas, & García-Gabín, 2007). Actualmente se han desarrollado propuesta híbridas de control basadas para el control de procesos, en (M. Herrera, et. al, 2018) el SMC es mezclado con un regulador lineal cuadrático (LQR) para un proceso de cuatro tanques. En (M. Herrera, et. al, 2017), el control de un tanque de mezclado es controlado por un esquema híbrido de control para solucionar el problema de retardo variable. Otros enfoques actuales han sido propuestos para el control de procesos químicos entre ellos el control por modos deslizantes dinámicos ha presentado resultados satisfactorios (Asimbaya et al., 2017; Baez, et. al, 2017), el problema de seguimiento de referencias variables es resuelto por el control basado en álgebra lineal (Camacho, Scaglia, & Lucia Quintero, 2017; Cartagena, Pillajo, Camacho, Rosales, & Scaglia, 2018; Sardella, Serrano, Camacho, & Scaglia, 2019).

Por otro lado las técnicas de control basadas en inteligencia artificial han sido satisfactoriamente desarrolladas para el control de procesos en la industria u otros procesos, entre ellas se han desarrollado esquemas basados en control difuso (Aguas, Cuaycal, Paredes, & Herrera, 2018; Aro, Escobar, Chávez, Leica, & Camacho, 2018; Baquero, Ochoa, Chávez, Camacho, & Colina, 2017; M. Herrera, et. al, 2019; Sanjuan, et. al, 2007; Villacres, et. al, 2017), redes neuronales (Juárez-lópez, Camacho, & Chairez, 2016; Salgado, et. al, 2019). Otras propuestas se enfocan en la sintonización de los controladores utilizando métodos de



optimización como el basado en enjambre de partículas (PSO) (J. Campos, et. al, 2018; J. Campos, Jaramillo, Morales, Camacho, & Chávez, 2018; Cuaycal, et. all , 2019), algoritmos genéticos (Carabali, et. al, 2017; Orosco, et. all, 2018; Terán-picón, Anderez, & Camacho, 2005).

Algunas estrategias consideran las no-linealidades presentes de los procesos industriales, por ejemplo, en (Bahri, et. al, 2017) se proponen emuladores multimodelo y neuronales para plantas no lineales multivariadas desacopladas con dinámica desconocida. Para el control de reactores químicos, se propone una estructura de predictor de Smith para sistemas con retardo y no lineales en la entrada (Lima, Santos, & Normey-Rico, 2015), otro utiliza backstepping adaptativo basado en ganancia dinámica para sistemas no lineales con retardo de tiempo desconocido (Zhang & Lin, 2015). Otra propuesta muy interesante basada en metodologías de álgebra lineal que ha sido aplicada a procesos industriales como: reactores (S. Rómoli, et. all , 2015; Suvire, Serrano, et. al, 2017), procesos de fermentación (S Rómoli et al., 2014), bioprocesos (Pantano, et. al, 2018). Estas estrategias mencionadas tratan la problemática del control no lineal sobre algunos procesos industriales, pero no toman en cuenta directamente el efecto de los retardos y peor aún los retardos dominantes.

Además, una herramienta que ha sido ampliamente utilizada para validar resultados cuando no se cuenta con el equipo sofisticado ya sea por sus elevados costos y poca flexibilidad que estos equipos presentan es el basado en simulaciones de Hardware-in-the-loop (HIL). En (Dai, et. al, 2016), se presenta una solución para el control supervisado basado en HIL para la industria minera. Para procesos de manufactura los sistemas basados en HIL ha sido implementado como se presenta en (Devesse, et. all, 2016; Harrison, Tilbury, & Yuan, 2012; Taylor, Park, & Chang, 2012). Técnicas de control sofisticadas han sido exitosamente aplicadas en sistemas HIL, por ejemplo en (Huyck, et. al, 2014) se desarrolla un control predictivo para el control de una columna de destilación. Los sistemas HIL también han sido aplicados exitosamente en sistemas de electrónica de potencia como es evidencia en (Lin, Xiahou, & Liu, 2018; Yang et al., 2018).

Abraham, A., & Pappa, N. (2016). An optimal centralized predictive control scheme applied to a Non-Square MIMO benchmark problem. *IFAC-PapersOnLine*, 49(13), 59–64.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.927>

Aguas, X., Cuaycal, A., Paredes, I., & Herrera, M. (2018). A fuzzy sliding mode for Planar 4-Cable Direct Driven Robot (Controlador por modos deslizantes difuso para un robot planar accionado por cuatro cables). *Enfoque UTE*, 9(4), 99–109.

Al-hadithi, B. M., Mat, F., & Haber-haber, R. (2012). Improvement of Takagi-Sugeno Fuzzy Model for the Estimation of Nonlinear Functions. *Asian Journal of Control*, C.
<https://doi.org/10.1002/asjc.310>

Ammathil, R., Narsaiah, T. B., & Rao, A. S. (2014). Design of decentralised Smith predictor for multivariable non-square processes with multiple time delays. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 21(2). <https://doi.org/10.1504/IJMIC.2014.060008>

Andújar, J. M., & Barragán, A. J. (2014). Hibridación de sistemas borrosos para el modelado y control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 11(2), 127–141.
<https://doi.org/10.1016/j.riai.2014.03.004>

Aro, K., Escobar, N., Chávez, D., Leica, P., & Camacho, O. (2018). Decentralized control versus



- a Fuzzy supervisory control: A comparison in a Quadruple-Tank Process. In *2018 IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)* (pp. 1–6). IEEE.
- Asimbaya, E., Cabrera, H., **Camacho, O.**, Chávez, D., & Leica, P. (2017). A Dynamical Discontinuous Control Approach for Inverse Response Chemical Processes. In *3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*.
- Baez, E., Bravo, Y., Leica, P., Chavez, D., & **Camacho, O.** (2017). Dynamical sliding mode control for nonlinear systems with variable delay. In *2017 IEEE 3rd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/CCAC.2017.8276426>
- Bahri, N., Atig, A., Ben Abdennour, R., Druaux, F., & Lefebvre, D. (2017). A systematic design of emulators for multivariable non square and nonlinear systems. *International Journal of Automation and Computing*, *14*(6), 742–754. <https://doi.org/10.1007/s11633-016-0963-9>
- Baquero, D., Ochoa, C., Chávez, D., **Camacho, O.**, & Colina, E. (2017). Adaptive sliding mode control based on fuzzy logic for variable dead time processes. In *2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2017* (Vol. 2017–Janua, pp. 114–119). <https://doi.org/10.1109/CoDIT.2017.8102576>
- Béla G. Lipták. (2006). *Process Control and Optimization. Practical Software Testing* (Vol. II). CRC press. https://doi.org/10.1007/0-387-21658-8_15
- Camacho, O.**, & Rojas, R. (2010). A General Sliding Mode Controller for Nonlinear Chemical Processes. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, *122*(4), 650–655.
- Camacho, O.**, Rojas, R., & García-Gabín, W. (2007). Some long time delay sliding mode control approaches. *ISA Transactions*, *46*(1), 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2006.06.002>
- Camacho, O.**, Rojas, R., & García, W. (1999). Variable structure control applied to chemical processes with inverse response. *ISA Transactions*, *38*(1), 55–72. [https://doi.org/10.1016/S0019-0578\(99\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0019-0578(99)00005-1)
- Camacho, O.**, Scaglia, G., & Lucia Quintero, O. (2017). A Dead Time Compensator Based on Linear Algebra (DTCLA). *IFAC-PapersOnLine*, *50*(1), 3075–3080. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.678>
- Camacho, O.**, & Smith, C. (2000). Sliding mode control: an approach to regulate nonlinear chemical processes. *ISA Transactions*, *39*(2), 205–218. [https://doi.org/10.1016/S0019-0578\(99\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0019-0578(99)00043-9)
- Camacho, O.**, Smith, C., & Moreno, W. (2003). Development of an Internal Model Sliding Mode Controller. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *42*, 568–573.
- Campos, J. J., Jaramillo, S., Morales, L., **Camacho, O.**, & Chávez, D. (2018). PSO Tuning for Fuzzy PD + I Controller applied to a Mobile Robot Trajectory Control. In *International Conference on Information System and COmputer Science* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/INCISCOS.2018.00017>



- Campos, J., Jaramillo, S., Morales, L., **Camacho, O.**, & Chávez, D. (2018). PD + I Fuzzy Controller optimized by PSO applied to a variable dead time process. In *2018 IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)* (pp. 1–6). IEEE.
- Carabali, C., Tituaña, L., Aguilar, J., **Camacho, O.**, & Chavez, D. (2017). Inverse Response Systems Identification using Genetic Programming. In *Internacional Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics* (Vol. 1, pp. 238–245). <https://doi.org/10.5220/0006421602380245>
- Cartagena, M., Pillajo, R., **Camacho, O.**, Rosales, A., & Scaglia, G. (2018). A Linear Algebra Controller Approach for Systems with Inverse Response. *2018 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS)*, 55–61. <https://doi.org/10.1109/INCISCOS.2018.00016>
- Chen, J., He, Z. F., & Qi, X. (2011). A new control method for MIMO first order time delay non-square systems. *Journal of Process Control*, 21(4), 538–546. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2011.01.007>
- Cruz, D. La, & **Camacho, O.** (2015). Controlador de Modos Deslizantes basado en Predictor de Smith y Modelo de Segundo Orden para Procesos con Elevado Retardo. *Revista Politécnica*, 35(2).
- Cuaycal, A., Paredes, I., **Herrera, M.**, & Pozo, D. (2019). Integral-Optimal Sliding Mode Controller Tuning with Particle Swarm Optimization applied to a Rotary Inverted Pendulum. *Revista Iberoamericana de Sistemas y Tecnologías de Informacion*, 19, 450–465.
- Dai, W., Zhou, P., Zhao, D., Lu, S., & Chai, T. (2016). Hardware-in-the-loop simulation platform for supervisory control of mineral grinding process. *Powder Technology*, 288, 422–434. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.11.032>
- Devesse, W., Baere, D. De, Hinderdael, M., & Guillaume, P. (2016). feedback Hardware-in-the-loop control of additive manufacturing processes using temperature feedback. *Journal of Laser Application*, 28(2). <https://doi.org/10.2351/1.4943911>
- Flesch, R. C. C., Santos, T. L. M., & Normey-Rico, J. E. (2012). Unified approach for minimal output dead time compensation in MIMO non-square processes. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 2376–2381. <https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6426660>
- Harrison, W. S., Tilbury, D. M., & Yuan, C. (2012). From Hardware-in-the-Loop to Hybrid Process Simulation : An Ontology for the Implementation Phase of a Manufacturing System. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9(1), 96–109.
- Herrera, M.**, Gonzales, O., Leica, P., & **Camacho, O.** (2018). Robust Controller Based on an Optimal - Integral Surface for Quadruple-Tank Process. In *2018 IEEE Third Ecuador*



Technical Chapters Meeting (ETCM) (pp. 1–6).

<https://doi.org/10.1109/ETCM.2018.8580343>

Herrera, M., Morales, L., & Rosales, A. (2017). Processes with variable dead time : Comparison of hybrid control schemes based on internal model. In *IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting* (pp. 1–6).

Herrera, M., Sarzosa, M., Paredes, I., & **Camacho, O.** (2019). Optima Control Based on Fuzzy Estimation of takagi'sugeno model for the furuta pendulum: Experimental Results. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 18, 12–24.

Huyck, B., Brabanter, J. De, Moor, B. De, Impe, J. F. Van, & Logist, F. (2014). Control Engineering Practice Online model predictive control of industrial processes using low level control hardware : A pilot-scale distillation column case study. *Control Engineering Practice*, 28, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.02.016>

Jiménez, A., Al-hadithi, B. M., & Matía, F. (2008). An Optimal T-S Model for the Estimation and Identification of Nonlinear Functions. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 3(10), 897–906.

Jin, Q. B., Hao, F., & Wang, Q. (2013). A multivariable IMC-PID method for non-square large time delay systems using NPSO algorithm. *Journal of Process Control*, 23(5), 649–663. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2013.02.007>

Jin, Q., Jiang, B., Wang, qi, & Shan, G. (2014). Decoupling internal model control for non-square processes based on equivalent transfer function. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 36(8), 1114–1131. <https://doi.org/10.1177/0142331214534110>

Juárez-lópez, S., Camacho, O., & Chairez, I. (2016). Super-twisting-based continuous neural networks modelling of second-order interconnected systems. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 00(00), 1–21. <https://doi.org/10.1080/13873954.2016.1238395>

Lima, D. M., Santos, T. L. M., & Normey-Rico, J. E. (2015). Robust nonlinear predictor for dead-time systems with input nonlinearities. *Journal of Process Control*, 27, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2015.01.005>

Lin, X., Xiahou, K., & Liu, Y. (2018). Design and Hardware-in-the-Loop Experiment of Multiloop Adaptive Control for DFIG-WT. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 65(9), 7049–7059.

Luan, X., Chen, Q., Albertos, P., & Liu, F. (2017). Compensator design based on inverted decoupling for non-square processes. *IET Control Theory & Applications*, 11(7), 996–1005. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2016.0335>

O. Camacho, J. M. (2017). *Procesos con Retardo de Tiempo Dominante*. Editorial académica Española.



- Ogunnaike, B. A., & Ray, W. H. (1994). *Process Dynamic Modeling and Control*. New York: Oxford University Press.
- Orosco, V., Chavez, D., **Camacho, O.**, & Aguilar, J. (2018). Algorithms. In *2018 IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)* (pp. 1–6). IEEE.
- Pantano, M. N., Fernández, M. C., Serrano, M. E., Ortiz, O. A., & Scaglia, G. J. E. (2018). Tracking Control of Optimal Profiles in a Nonlinear Fed-Batch Bioprocess under Parametric Uncertainty and Process Disturbances. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(32), 11130–11140. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b01791>
- Rómoli, S., Scaglia, G. J. E., Serrano, M. E., Godoy, S. A., Ortiz, O. A., & Vega, J. R. (2014). Control of a Fed-Batch Fermenter Based on a Linear Algebra Strategy. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, 12(7), 1206–1213.
- Rómoli, S., Serrano, M. E., Ortiz, O. A., Vega, J. R., & Eduardo Scaglia, G. J. (2015). *Tracking control of concentration profiles in a fed-batch bioreactor using a linear algebra methodology*. *ISA Transactions* (Vol. 57). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2015.01.002>
- Salgado, I., Ahmed, H., **Camacho, O.**, & Chairez, I. (2019). Adaptive sliding - mode observer for second order discrete - time MIMO nonlinear systems based on recurrent neural - networks. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 0(0), 0. <https://doi.org/10.1007/s13042-018-00908-z>
- Sanjuan, M., **Camacho, O.**, Smith, C., Iglesias, E., & Garc, Y. (2007). Fuzzy surface-based sliding mode control. *ISA Transactions*, 46, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2006.04.002>
- Sardella, M. F., Serrano, M. E., **Camacho, O.**, & Scaglia, G. J. E. (2019). Design and Application of a Linear Algebra Based Controller from a Reduced-Order Model for Regulation and Tracking of Chemical Processes under Uncertainties. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58, 15222–15231. research-article. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b01257>
- Seborg, D. E., Thomas, F. E., & Duncan A, M. (2004). *Process Dynamics and Control*. John Wiley & Sons.
- Skogestad, S., & Postlethwaite, I. (2001). *Multivariable feedback control: analysis and design*. *International Journal of Robust and Nonlinear Control* (Vol. 8). <https://doi.org/978-0-470-01167-6>
- Suvire, R., Serrano, M., Vega, J., Ortiz, O., & Scaglia, G. (2017). Nonlinear Controller for Trajectory Tracking of a Continuous Stirred Tank Reactor. *Control Engineering and Applied Informatics*, 19(4), 112–121.
- Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, (1), 116–132.



- Tanaka, K., & Wang, H. O. (2004). *Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach*. John Wiley & Sons.
- Taylor, P., Park, S., & Chang, M. (2012). Hardware-in-the-loop simulation for a production system. *International Journal of Production Reserach*, 50(8), 37–41. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.575097>
- Terán-picón, J. C., Anderez, J., & **Camacho, O.** (2005). Genetics algorithms as a tuning tool for PID and sliding mode controllers. *Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería Universidad Del Zulia*, 28(3), 42–55.
- Villacres, J., **Herrera, M.**, Sotomayor, N., & **Camacho, O.** (2017). A Fuzzy Sliding Mode Controller from a reduced order model: A mobile robot experimental application. In *International Conference on Control, Decision and Information Technologies* (Vol. 1, pp. 674–678).
- Yang, X., Yang, C., Peng, T., Chen, Z., Liu, B., & Gui, W. (2018). Hardware-in-the-Loop Fault Injection for Traction Control System. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6(2), 696–706. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2018.2794339>
- Zhang, X., & Lin, Y. (2015). Adaptive Control of Nonlinear Time-Delay Systems With Application to a Two-Stage Chemical Reactor. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 60(4), 1074–1079.

13. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROYECTO, INCLUIDO METODOLOGÍA

Los trabajos mencionados en el estado del arte no toma en cuenta que las plantas industriales que incluyen procesos químicos como columnas de destilación, reactores químicos, o intercambiadores de calor entre otros, son intrínsecamente no lineales (Seborg et al., 2004), esto hace que una representación basada en modelos linealizados sea ineficiente, debido a que es una simplificación de la realidad y considera un rango de operación limitada, además. Por lo cual es importante investigar técnicas que permitan simplificar modelos complejos no lineales que sean capaces de modelar incertidumbres manteniendo de cierta manera sus características no lineales y a partir de las cuales se puedan desarrollar esquemas de control más robustos para procesos químicos. Una manera de hacer frente a la antes mencionada problemática es desarrollar un modelo no lineal que este compuesto de una serie de submodelos simples. La idea del modelado difuso (Takagi & Sugeno, 1985) utilizando el concepto de la teoría de conjuntos difusos ofrece una técnica para construir modelos múltiples del proceso basados en datos entrada-salida (Al-hadithi, Mat, & Haber-haber, 2012; Jiménez, Al-hadithi, & Matía, 2008) o el modelo matemático original del sistema, y han sido de gran atención debido que es una poderosa solución para el desarrollo de aproximación de funciones no lineales, técnicas sistemáticas para el análisis de estabilidad y diseño de sistemas de control difuso. Un enfoque para la construcción de estos modelos difusos es la aproximación local o sector no lineal (Tanaka & Wang, 2004).. Como se puede notar el modelado difuso T-S ha presentado resultados eficientes en el control de sistemas de naturaleza: altamente no lineal, multivariable e inestable, muy común en los procesos industriales en donde las incertidumbres en los parámetros del modelo están presentes. Además, el modelo difuso T-S como técnica de lógica difusa permite mezclar técnicas convencionales de control lineal como el Regulador Cuadrático Lineal, Control predictivo, Control de Estructura Variable con el modelado difuso T-S y han mejorado el rendimiento del sistema de control para procesos no lineales (Andújar & Barragán,



2014). De esta manera en este trabajo se pretende utilizar la técnica de modelado difuso para obtener representaciones más realistas de los procesos que serán estudiados.

Además, acorde a la revisión bibliográfica se puede evidenciar que las técnicas de control basadas en inteligencia artificial pueden ser fácilmente mezcladas con técnicas convencionales para lograr esquemas más robustos que sean capaces de manejar incertidumbres, gran cantidad de información y que puedan optimizar los procesos a controlar. Finalmente, una herramienta muy útil, barata, flexible y que ha sido ampliamente usada para validar de manera experimental las propuestas de control en varios campos de la ingeniería se basan en Hardware-in-the-loop será de gran apoyo para el desarrollo de este trabajo.

De manera, desarrollar e implementar algoritmos de control basados en inteligencia artificial serán utilizados para resolver problemas reales de procesos de la industria petroquímica, farmacéutica, alimentaria, etc. donde están presentes columnas de destilación, reactores químicos, intercambiadores de calor entre otros; procesos de manufactura, u otros procesos químicos en la industria, lo cual permitirá a los procesos industriales obtener productos terminados de alto valor agregado con exigentes características de calidad, optimizando el consumo energético y materia prima, y que cumplan con las rigurosas exigencias de normas ambientales y regulaciones de seguridad.

Para alcanzar los objetivos los objetivos de la investigación a desarrollar se sustenta en las siguientes cinco fases:

Fase Teórica:

En esta fase se realizarán los estudios teóricos necesarios para sustentar el presente proyecto.

- Se estudiarán los procesos químicos más representativos a nivel de industrias como: petroquímica, farmacéutica, alimentaria, entre otras, mediante una revisión bibliográfica de estos y posteriormente se seleccionará al menos uno para aplicar las técnicas de inteligencia que se estudiará.
- Se estudiarán técnicas de control basadas en inteligencia artificial para aplicar a los procesos químicos que han sido previamente seleccionados, se dará énfasis a las técnicas de modelamiento difuso, aprendizaje por redes neuronales, optimización utilizando algoritmos evolutivos y/o bio-inspirados, entre otras..
- Se realizará una revisión bibliográfica de esquemas de control basados en simulaciones hardware-in-the-loop utilizando sistemas embebidos aplicados a procesos químicos.

Fase de diseño:

En esta fase se diseñaran algoritmos de control para los procesos químicos seleccionados utilizando las técnicas estudiadas.

- Se desarrollarán algoritmos basados en las técnicas de inteligencia artificial previamente estudiadas para el modelamiento, la sintonización y el control de los procesos químicos seleccionados.

Fase de Simulación y validación :

En esta fase se simularán los algoritmos desarrollados en el software de simulaciones Matlab-Simulink y/o Labview. Además, si es necesario se desarrollan librerías en Python u otro lenguaje de programación.



- Se implementarán los algoritmos de control inteligente desarrollados y simulados previamente en los procesos químicos seleccionados utilizando Hardware-in-the-loop (HIL) a través de sistemas embebidos. Se utilizarán métricas de rendimiento mediante la comparación con otras técnicas presentes en la literatura.

Fase de Presentación de resultados:

- En esta fase se publicarán los resultados obtenidos mediante la realización de artículos científicos presentados en congresos y/o revistas de alto impacto.

14. INFRAESTRUCTURA Y EQUIPOS

- Indicar la infraestructura y equipos **disponibles** para la ejecución del proyecto, con la ubicación actual de los mismos

Actualmente, no se cuenta con un laboratorio y/o infraestructura disponible donde se implementen aplicaciones basadas en simulaciones de Hardware-in-the-loop.

15. MONTO REQUERIDO

15.1 Monto y justificación del equipo requerido

- Maquinaria y equipo especializado: el monto de este rubro es de \$2.699,20 el cual contempla la adquisición de sistemas embebidos, tarjetas electrónicas de desarrollo, módulos didácticos de temperatura y material eléctrico, sensores, estos insumos son necesarios para realizar un pequeño laboratorio de sistemas basados en HIL debido a que el Departamento de Automatización y Control Industrial cuenta con el mismo. Y esto permitirá la realización de las pruebas necesarias para los algoritmos de control que se desarrollarán en este proyecto y posteriormente pueden ser usadas para prácticas docentes.
- Equipo Informático: el monto de este rubro es de \$1.568,00 el cual contempla computador portátil, insumos necesarios para el desarrollo de las actividades técnicas del proyecto.

15.2 Monto y justificación del personal requerido

- Personal Requerido: el monto de este rubro es de \$882,68 el cual contempla el apoyo de un ayudante de investigación por seis (4) meses. Esta persona se encargará de la parte operativa sobre los procedimientos establecidos en el proyecto.

15.5 Monto y justificación de los ponencias nacionales y pagos de inscripciones

- Pago de ponencias e inscripciones: el monto de este rubro es de \$840,00 el cual contempla la presentación de artículos en congresos.

16. FONDOS ADICIONALES

- *Otros fondos de otros organismos (si los hubiere)*

B. DATOS INFORMATIVOS

1. INFORMACIÓN DEL DIRECTOR, CODIRECTOR, COLABORADORES Y COLABORADORES TÉCNICOS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y VINCULACIÓN



Apellidos y nombres	No. de Cédula	HSS*	Departamento	Rol	Título de mayor nivel y mención.
Camacho Quintero Oscar Eduardo	1757261837	10	DACI	Director	Doctor of Philosophy in Engineering Science
Herrera Garzon Marco Antonio	1716981616	6	DACI	Colaborador	Master Universitario en Automática y Robótica

* HSS =Horas Semana Semestre: Es el número de horas que se dedica por semana a la investigación. Este número de horas se mantiene para todo el semestre.



DECLARACIÓN FINAL
DECLARACIÓN DEL DIRECTOR DEL PROYECTO

El equipo de investigadores, representado por el Director del Proyecto declara lo siguiente:

- Que el presente proyecto es una creación original de mi autoría y del equipo de investigadores, y por tanto asumimos la completa responsabilidad legal en caso de que un tercero alegue la titularidad de los derechos intelectuales del proyecto, exonerando a la EPN de cualquier acción legal que se derive por esta causa.
- Que el presente proyecto no ha sido presentado en ninguna convocatoria de otra institución pública o privada. El incumplimiento será causal para que el proyecto no sea tomado en consideración.
- Que si el proyecto genera algún producto o procedimiento susceptible de obtener derechos de propiedad intelectual, de los cuales se deriven beneficios, aceptamos que éstos serán compartidos entre los investigadores y la institución o las instituciones participantes en el proyecto, conforme a lo establecido en el COESC.
- Que el equipo de investigadores y/o instituciones participantes se comprometen a mantener la confidencialidad de la información si ésta podría ser susceptible de protección por patentes, y solicitar la valoración de propiedad intelectual respectiva previa a cualquier publicación o difusión.
- Que para el caso de derechos de autor otorgamos una licencia de uso exclusivo con fines académicos para la o las instituciones participantes en el proyecto.
- Que aceptamos conocer y cumplir con la normativa vigente para la gestión de proyectos.

Firma del Director del Proyecto

Nombre: Dr. Oscar Camacho

C.I.: 1757261837



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
 VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y VINCULACIÓN
 Proyecto de Investigación Interno
 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES DEL PROYECTO



Título del Proyecto:

CONTROL INTELIGENTE DE PROCESOS QUÍMICOS UTILIZANDO SIMULACIONES HARDWARE-IN-THE-LOOP

Nº	Actividad	AÑO 1																																															
		Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4				Mes 5				Mes 6				Mes 7				Mes 8				Mes 9				Mes 10				Mes 11				Mes 12			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Determinar y seleccionar los procesos químicos más representativos a nivel de industrias como: petroquímica, farmacéutica, alimentaria, entre otras.	[Shaded]																																															
1,1	Actividad 1: Realizar un estudio para la selección de los procesos químicos más representativos.	[Shaded]																																															
2	Estudiar técnicas de control basadas en inteligencia artificial para aplicar a los procesos químicos seleccionados, dando énfasis a técnicas basadas en modelamiento difuso, aprendizaje profundo, optimización utilizando algoritmos evolutivos y/o bio-inspirados, etc.	[Shaded]																																															
2,1	Actividad 1: Realizar un estudio de técnicas de control basadas en inteligencia artificial	[Shaded]																																															
3	Realizar una revisión bibliográfica de esquemas de control basados en simulaciones HIL utilizando sistemas embebidos aplicados a procesos químicos.	[Shaded]																																															
3,1	Actividad 1: Realizar una revisión bibliográfica de esquemas de control basados en simulaciones HIL	[Shaded]																																															
3,2	Producto esperado: Un estudio de los procesos químicos más representativos, un estudio de las técnicas de control basadas en inteligencia artificial y una revisión bibliográfica de esquemas de control basados en simulaciones HIL	[Shaded]																																															
4	Desarrollar algoritmos basados en las técnicas de inteligencia artificial estudiadas para el modelamiento, la sintonización y el control de los procesos químicos seleccionados.	[Shaded]																																															
4,1	Actividad 1: Se desarrolla algoritmos de control inteligentes para el modelamiento, sintonización y control de procesos químicos	[Shaded]																																															
5	Implementar los algoritmos de control inteligente desarrollados a los procesos químicos seleccionados utilizando simulaciones Hardware-in-the-loop (HIL) a través de sistemas embebidos.	[Shaded]																																															
5,1	Actividad 1: Se implementan los algoritmos de control inteligentes desarrollados utilizando simulaciones HIL	[Shaded]																																															
5,2	Producto esperado: Al menos un algoritmo de control inteligente desarrolla e implementado para el control de procesos químicos utilizando simulaciones HIL	[Shaded]																																															
6	Publicar los resultados obtenidos mediante la realización de artículos científicos presentados en congresos y/o revistas de alto impacto.	[Shaded]																																															
6,1	Actividad 1: Se presentan los resultados obtenidos en congresos y/o revistas a través de publicaciones científicas	[Shaded]																																															
6,2	Producto esperado: Al menos artículo científico presentado en un congreso y otro enviado a una revista	[Shaded]																																															



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y VINCULACIÓN
PRESUPUESTO PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN



AÑO 1

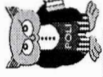
Título del proyecto

CONTROL INTELIGENTE DE PROCESOS QUÍMICOS UTILIZANDO SIMULACIONES HARDWARE-IN-THE-LOOP

Lista de Items	Cantidad	Unidad	Precio Unitario Referencial	Precio Total Referencial	Precio Unitario Referencial con IVA/ Aporte del IESS	Precio Total Referencial con IVA / Aporte del IESS
1 Contratación de servicios personales por contrato						
1.1 Ayudante de investigación 1	4	mes	\$ 220,67	\$ 882,68	\$ 220,67	\$ 882,68
1.2 Ayudante de investigación 2		mes	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
1.3 Prestación de servicios profesionales 1 (Homologado Escala de remuneración de servidores publicos)		mes	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
1.4 Prestación de servicios profesionales 2 (Homologado Escala de remuneración de servidores publicos)		mes	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Subtotal 1			\$ 220,67	\$ 882,68	\$ 220,67	\$ 882,68
2 Maquinaria y equipo especializado						
2.1 Sistemas embebidos /	1		\$ 1,400,00	\$ 1,400,00	\$ 1,568,00	\$ 1,568,00
2.2 Tarjetas electrónicas de desarrollo con accesorios	2		\$ 120,00	\$ 240,00	\$ 134,40	\$ 268,80
2.3 Modulo didactico de control de temperatura	2		\$ 70,00	\$ 140,00	\$ 78,40	\$ 156,80
2.4 Material electrico, actuadores y sensores	1		\$ 630,00	\$ 630,00	\$ 705,60	\$ 705,60
Subtotal 2			\$ 2,220,00	\$ 2,410,00	\$ 2,486,40	\$ 2,699,20
3 Equipo informático						
3.1 Computador Portatil	1		\$ 1,400,00	\$ 1,400,00	\$ 1,568,00	\$ 1,568,00
Subtotal 3			\$ 1,400,00	\$ 1,400,00	\$ 1,568,00	\$ 1,568,00
4 Insumos y reactivos						
4.1 Item 1 (Detallar nombre de los insumos y reactivos)			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
4.2 Item 2 (Detallar nombre de los insumos y reactivos)			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Subtotal 4			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
5 Literatura especializada						
5.1 Cantidad de libros (especificar el area)			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
5.2 Adquisición de artículos científicos			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Subtotal 5			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
6 Salidas de campo y de muestreo						
6.1 Pasajes al interior			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
6.2 Viaticos y subsistencias al interior			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Subtotal 6			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
7 Ponencias nacionales, capacitaciones y/o visitas técnicas						
7.1 Pasajes al interior	1		\$ 150,00	\$ 150,00	\$ 168,00	\$ 168,00
7.2 Viaticos y subsistencias al interior	2		\$ 50,00	\$ 100,00	\$ 56,00	\$ 112,00
Subtotal 7			\$ 200,00	\$ 250,00	\$ 224,00	\$ 280,00
8 Ponencias en el exterior, capacitaciones, y/o visitas técnicas						
8.1 Pasajes al exterior			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
8.2 Viaticos al exterior			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Subtotal 8			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
9 Pago de inscripciones						
9.1 Pago de inscripciones al interior	1		\$ 500,00	\$ 500,00	\$ 560,00	\$ 560,00
9.2 Pago de inscripciones al exterior			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Subtotal 9			\$ 500,00	\$ 500,00	\$ 560,00	\$ 560,00
10 Pago de publicaciones, suscripciones y patentes						
10.1 Pago de publicaciones			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
10.2 Pago de publicaciones al exterior			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
10.3 Pago de suscripciones			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
10.3 Pago de patentes			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Subtotal 10			\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
TOTAL				\$ 5,442,68		\$ 5,989,88



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y VINCULACIÓN
PRESUPUESTO PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN**



Título del proyecto	
CONTROL INTELIGENTE DE PROCESOS QUÍMICOS UTILIZANDO SIMULACIONES HARDWARE-IN-THE-LOOP	

Presupuesto consolidado sin IVA

AÑO	Contratación de servicios personales por contrato	Maquinaría y equipo especializado	Equipo informático	Insumos y reactivos	Literatura especializada	Salidas de campo y de muestreo	Ponencias nacionales, capacitaciones y/o visitas técnicas	Ponencias en el exterior, capacitaciones, y/o visitas técnicas	Pago de inscripciones	Pago de publicaciones y patentes	Total sin IVA
1	\$ 882,68	\$ 2,410,00	\$ 1,400,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 250,00	\$ -	\$ 500,00	\$ -	\$ 5,442,68
2	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
3	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
TOTAL	\$ 882,68	\$ 2,410,00	\$ 1,400,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 250,00	\$ -	\$ 500,00	\$ -	\$ 5,442,68

Presupuesto consolidado con IVA

AÑO	Contratación de servicios personales por contrato	Maquinaría y equipo especializado	Equipo informático	Insumos y reactivos	Literatura especializada	Salidas de campo y de muestreo	Ponencias nacionales, capacitaciones y/o visitas técnicas	Ponencias en el exterior, capacitaciones, y/o visitas técnicas	Pago de inscripciones	Pago de publicaciones y patentes	Total con IVA
1	\$ 882,68	\$ 2,699,20	\$ 1,568,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 280,00	\$ -	\$ 560,00	\$ -	\$ 5,989,88
2	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
3	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
TOTAL	\$ 882,68	\$ 2,699,20	\$ 1,568,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 280,00	\$ -	\$ 560,00	\$ -	\$ 5,989,88