
EMULACIÓN DE LA EVOLUCIÓN BIOLÓGICA EN EL PROCESO DE SINTONIZACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO

Miguel Gabriel Villarreal-Cervantes^{1*}, Alejandro Rodríguez-Molina², Saul Enrique Benitez-García¹ y Omar Serrano-Pérez³

¹ Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC, Departamento de Posgrado, Ciudad de México 07700, México.

Correo electrónico: mvillarrealc@ipn.mx, sbenitezg1100@alumno.ipn.mx

² Tecnológico Nacional de México/IT de Tlalnepantla, División de Posgrado e Investigación, Estado de México 54070, México.

Correo electrónico: alejandro.rm@tlalnepantla.tecnm.mx.

³ Instituto Politécnico Nacional, UPIIG, Silao de la Victoria, Guanajuato 36275, México.

Correo electrónico: oserranop@ipn.mx

* Autor de correspondencia

Resumen

La selección de las ganancias (sintonización) en un sistema de control de una planta o sistema es una tarea difícil. En los últimos años se ha estado optando en incorporar la emulación de la evolución natural y la supervivencia del más apto en el proceso de selección de dichas ganancias. No obstante, su implementación en la práctica aún presenta diversos desafíos. Así, en este artículo se proporciona un panorama general de las ventajas y desventajas de los métodos de sintonización existentes, así como se describen y esquematizan las etapas principales del proceso de optimización para la sintonización de controladores, encaminada al uso de estrategias de cómputo evolutivo. Por lo que se enfatiza la importancia del proceso evolutivo en dichas estrategias para encontrar soluciones prometedoras en tan compleja tarea.

Palabras clave: Sintonización óptima, cómputo evolutivo, optimización en ingeniería de control.

Abstract

The selection of gains (tuning) in a control system of a plant or system is a difficult task. In recent years, the natural evolution emulation and the survival of the fittest have been incorporated into the selection process. However, its implementation in practice still presents several challenges. Thus, this

article provides an overview of the advantages and disadvantages of existing tuning methods and describes and outlines the main stages of the optimization process for controller tuning, aimed at the use of evolutionary computation strategies. Therefore, the importance of the evolutionary process is emphasized in these strategies to find promising solutions in such a complex task.

Keywords: Optimal tuning, evolutionary computation, control engineering optimization.

1. Introducción

En la vida cotidiana cada vez es más importante tener el control automático de los sistemas que nos rodean, como por ejemplo en un acuario se requiere manipular la temperatura del agua de los peces para que puedan mantenerse en un rango de temperatura adecuado para poder vivir.

Un sistema de control automático generalmente está compuesto de sensores, planta, controlador y actuadores. Los sensores son los elementos de medición de las variables de la planta (variable de salida) y que transforma la variable medida en una señal que pueda ser interpretada por el controlador. Esta señal por lo tanto se conecta a la entrada del controlador junto con el valor de referencia o de consigna deseada para la variable de salida. El controlador es un dispositivo que se utiliza para detectar y corregir los desvíos existentes entre el valor medido de la variable de salida y el valor de la consigna. Los actuadores son los elementos finales que modifican el valor de la variable de salida de la planta. La planta es el sistema que se desea gobernar.

Para el ejemplo del acuario, éste se considera la planta o sistema. La(s) variable(s) a controlar de la planta (variable(s) de salida) se obtiene a través de un sensor o de técnicas de estimación que permitan aproximar su valor. Para el caso particular, la medición de temperatura del agua del acuario por medio de un termopar es la variable a controlar. Es así, que el control automático permite gobernar a la planta (el acuario) al manipular las variables de salida de la planta (la temperatura) con el propósito de alcanzar y mantener una meta establecida o de consigna. Para este caso, se debe de mantener una temperatura predefinida por el usuario a través de una acción de control que será la variable de entrada a la planta (observar ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). Esta variable de entrada (acción de control) permitirá hacer cambios a la planta con el propósito de cumplir la consigna establecida. La acción de control en el acuario proporcionará la cantidad de corriente eléctrica que se le aplica a la resistencia del calentador del acuario para modificar la variable de salida (temperatura). El valor de la temperatura se retroalimenta al sistema de control para incrementar o decrementar la corriente o incluso, desenergizar el calentador. De esta forma se pueden manipular otros sistemas más complejos a través de un control automático como, por ejemplo, vehículos espaciales, proyectiles guiados, coordinación de robots aéreos para vigilancia, etc.

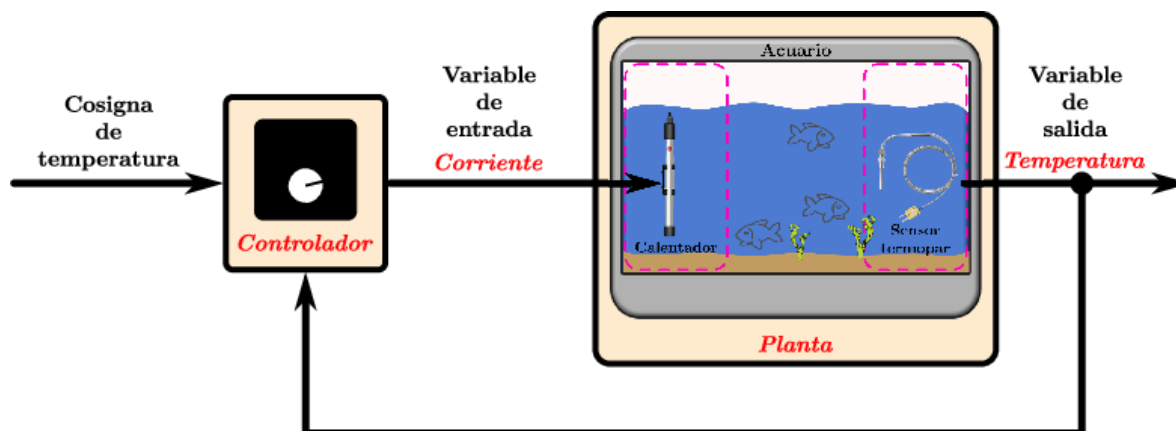


Figura 1. Sistema de control en lazo cerrado de un acuario.

En la actualidad, cada vez es más necesario tener sistemas de control (controladores) que permitan gobernar plantas complejas, que un operario humano no podría manejar por la cantidad de variables de salida y por la poca precisión que se podría tener en el manejo de la variable de entrada a la planta. La eficiencia en el desempeño del controlador de una planta o sistema a controlar depende de su diseño y del proceso de sintonización. El diseño del controlador se refiere a un análisis matemático que garantice, que, al incluir el sistema de control en la planta, la convergencia del error entre las variables de salida de la planta y el(los) valor(es) de consigna que se desea(n) en dichas variables tienda de forma teórica a cero o a una región cercana a ésta. Por otro lado, la sintonización del controlador de una planta se refiere al proceso de encontrar los parámetros (ganancias) del controlador con el fin de lograr satisfacer uno o varios índices de rendimiento de control (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Estos índices se pueden contextualizar, por ejemplo, en minimizar las oscilaciones entre las variables del proceso con los valores deseados o de consigna, proporcionar un alto grado de exactitud en el cumplimiento de la tarea a realizar, obtener una rápida respuesta ante cambios en los valores de las consignas, requerir de un consumo energético eficiente, así como establecer que dichos índices sean tan insensibles como sea posible a incertidumbres y perturbaciones.

Sin embargo, el diseño del controlador no asegura que se satisfaga de la mejor manera posible uno o varios índices de rendimiento de control. Como por ejemplo, en el monitor de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observan tres diferentes comportamientos de la señal de salida de una planta, que se generan a partir de la selección de tres diferentes parámetros de ganancia K del controlador. Se puede notar también, que, al finalizar la gráfica, las tres señales de salida alcanzan el valor de consigna deseado (referencia). En este ejemplo se observa que el diseño del controlador asegura que las señales de salida converjan a la referencia, sin embargo, con una diferente selección de parámetros del controlador, la salida de la planta podría aumentar o disminuir su oscilación la cual impactaría en el desempeño general del sistema de control en la planta. Para el ejemplo particular del acuario con el que se inició, imaginemos que la oscilación de la temperatura varía $\pm 15^\circ\text{C}$ alrededor del valor deseado el cual es de 25°C , y que después de seis horas se estabiliza a 25°C , como es lo esperado. Para este caso, el desempeño en el sistema de control sería muy pobre ya que para alcanzar la temperatura de 25°C habría momentos en los que se alcanzarían temperaturas de hasta los

40°C, y con estas temperaturas algunas especies no sobrevivirían. Es así, que con este planteamiento el diseño del controlador es adecuado, aunque sería porque establece la temperatura del acuario al valor deseado en un tiempo de seis horas, sin embargo, la sintonización del controlador no lo sería, ya que se podrían alcanzar temperaturas muy altas en el proceso para regular la temperatura del acuario, por lo que en este ejemplo sencillo se puede observar la importancia sobre el proceso para realizar la sintonización de las ganancias del controlador.

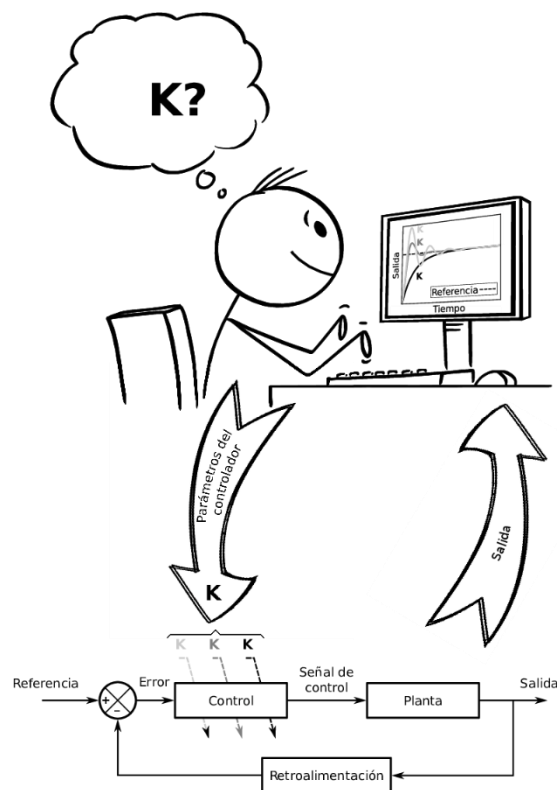


Figura 1. Representación gráfica de la sintonización de diversas ganancias en el controlador con diferente rendimiento en el sistema en lazo cerrado.

Desde la aparición del controlador Proporcional, Integral y Derivativo (PID) en 1910 por Elmer Sperry, ha existido la preocupación de establecer procedimientos de sintonización que garanticen un desempeño apropiado en el (los) índice(s) de rendimiento de los sistemas de control.

Una tendencia a nivel industrial para realizar la sintonización del controlador de una planta es la de describir, a través de un modelo matemático reducido, el comportamiento de una región de interés y así, con el modelo y la salida deseada poder implementar un proceso de sintonización. Debido a que las plantas a controlar son sistemas complejos que no pueden ser descritos por un modelo reducido, el uso de estos procesos representa un reto para obtener ganancias del controlador prometedoras en un entorno real. Por lo que una limitación que presentan algunos de los programas de sintonización de controladores existentes, es la incapacidad de manejar bien la complejidad de la planta, debido a fenómenos como zona muerta, histéresis, juego entre engranes, así como el incluir tareas fuera del rango de operación del modelo reducido.

Por otro lado, otra problemática que se presenta es que las ganancias del controlador se deben reajustar debido al deterioro de la planta por motivos de su uso continuo o cuando las condiciones de funcionamiento son modificadas. Por lo que se podría optar por procesos de sintonización en donde las ganancias se adapten en tiempo real (tiempo de operación), para producir un mejor comportamiento en el cumplimiento de los índices de rendimiento de control (compromisos de diseño).

Por las problemáticas expuestas anteriormente y debido al crecimiento de demandas complejas en aplicaciones reales, en las que se requiere cumplir varios compromisos de diseño, en los últimos años se han utilizado metodologías y técnicas de inteligencia computacional y de cómputo suave para emular la decisión realizada por un experto en el establecimiento de las ganancias del controlador.

Entre las técnicas de inteligencia computacional, las estrategias de cómputo evolutivo están siendo ampliamente usadas para resolver problemas complejos de sintonización de controladores (Rodríguez-Molina et al., 2020), ya que éstas pueden utilizarse para resolver dichos problemas en un tiempo razonable y son relativamente fáciles de programar; son técnicas que conforman un conjunto de soluciones potenciales (ganancias del controlador) al problema de sintonización, llamada población, que evolucionan través de la emulación de mecanismos de inspiración biológica, lo que permite tener más probabilidades de proporcionar una mejor solución al problema complejo. De aquí, la importancia del uso de cómputo evolutivo para buscar ganancias del controlador en el problema de sintonización y así, dar como resultado un sistema de control que realice la tarea de una mejor manera.

1.1 Clasificación en la sintonización de controladores

Las primeras reglas de sintonización de controladores fueron introducidas por Ziegler y Nichols en 1942 (Ziegler et al., 1942) y a partir de ese momento, varias reglas de sintonización han sido desarrolladas.

Una de las taxonomías que se han estado utilizando en los procesos de sintonización de acuerdo con su naturaleza y uso (Villarreal-Cervantes & Alvarez-Gallegos, 2016) es la que se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y a continuación se explica.

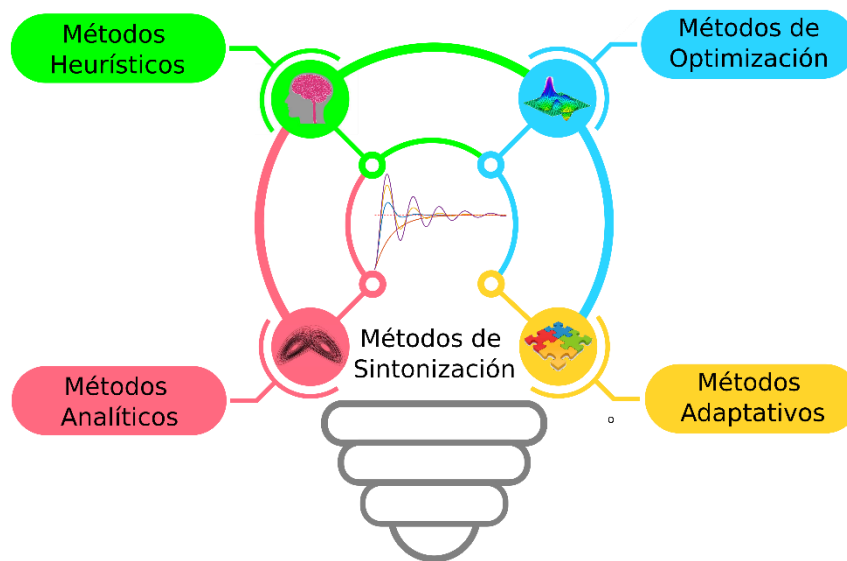


Figura 2. Taxonomía de los procesos de sintonización de acuerdo con (Villarreal-Cervantes & Alvarez-Gallegos, 2016).

- **Métodos analíticos:** En este proceso de sintonización, las condiciones para obtener las ganancias del controlador se establecen a partir de un análisis de estabilidad del sistema en lazo cerrado a través de la teoría de control automático, como por ejemplo enfoques conformados con la teoría de Lyapunov para la sintonización del controlador en robots manipuladores (Mendoza et al., 2015).
- **Métodos heurísticos:** En este proceso, el procedimiento se basa en reglas obtenidas por la experiencia en la sintonización manual de controladores y la premisa de tener una cierta estructura simple en la planta y salida deseada. El método heurístico más conocido para la sintonización de controladores es el método de Ziegler-Nichols (Åström et al., 2006) y otros representativos como el método Tyreus-Luyben, el método Cohen y Coon, el método Ciancone-Marline, entre otros.
- **Métodos de optimización:** En este proceso de sintonización se incluye un proceso de optimización en donde se plantea un problema de programación matemática (Bazaraa et al., 2006) y se resuelve con técnicas de optimización. Una de las características principales de estos métodos, es que las ganancias del controlador se obtienen a partir de un proceso de optimización independiente que es evaluado en un modelo matemático aproximado de la planta o en modelos subrogados (meta modelos) (Serrano-Pérez et al., 2021) en lugar de la planta. Una vez realizado lo anterior, se procede a incluir, al sistema de control en lazo cerrado de la planta, las ganancias constantes obtenidas. A esta forma de obtener las ganancias del controlador (con valores constantes) se le conoce como sintonización fuera de línea (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y al proceso de optimización que se considera para resolver este problema se le llama fuera de línea.
- **Métodos adaptables:** En este proceso se puede hacer uso de los tres métodos previos. En la mayoría de los casos, se requiere de un proceso de identificación de la planta en tiempo

real, para representarla a través de un modelo matemático en una forma más aproximada. La principal característica de este proceso de sintonización es que las ganancias del controlador cambian con respecto al tiempo, por lo que son más aptas para enfrentar incertidumbres en la planta y perturbaciones (Rodríguez-Molina et al., 2021). Cuando las ganancias del controlador presentan variaciones a través de la ejecución del sistema de control en lazo cerrado, se dice que la sintonización es en línea o en tiempo de ejecución (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y cuando un proceso de optimización se introduce en éste, se le atribuye el término optimización en línea.

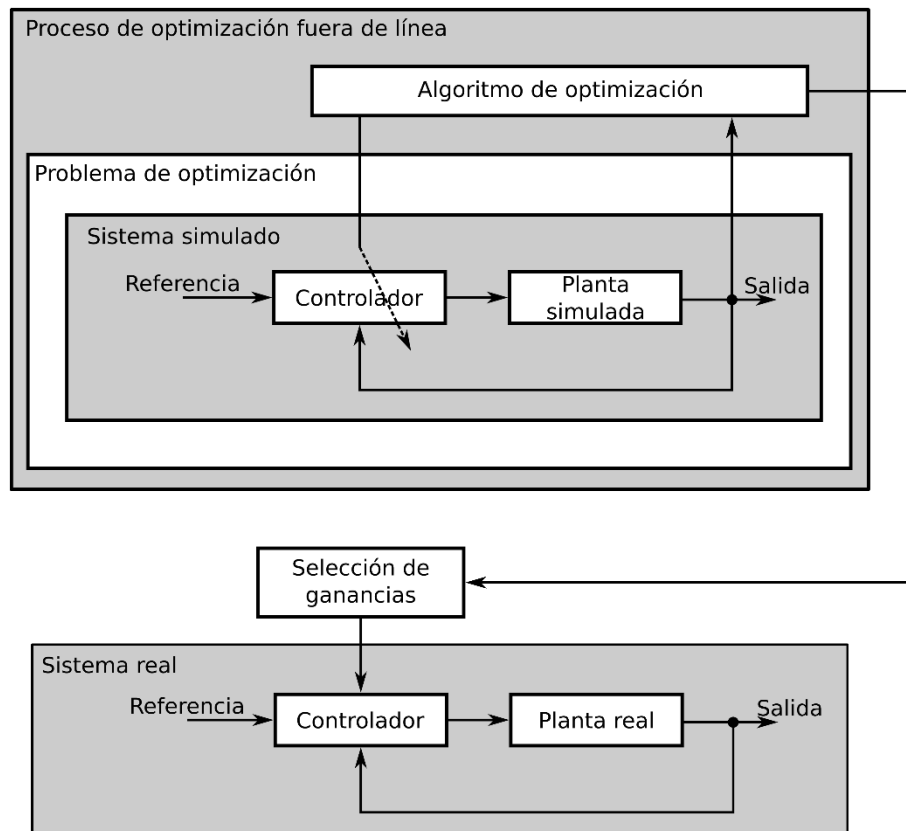


Figura 3. Representación esquemática del proceso de sintonización fuera de línea.

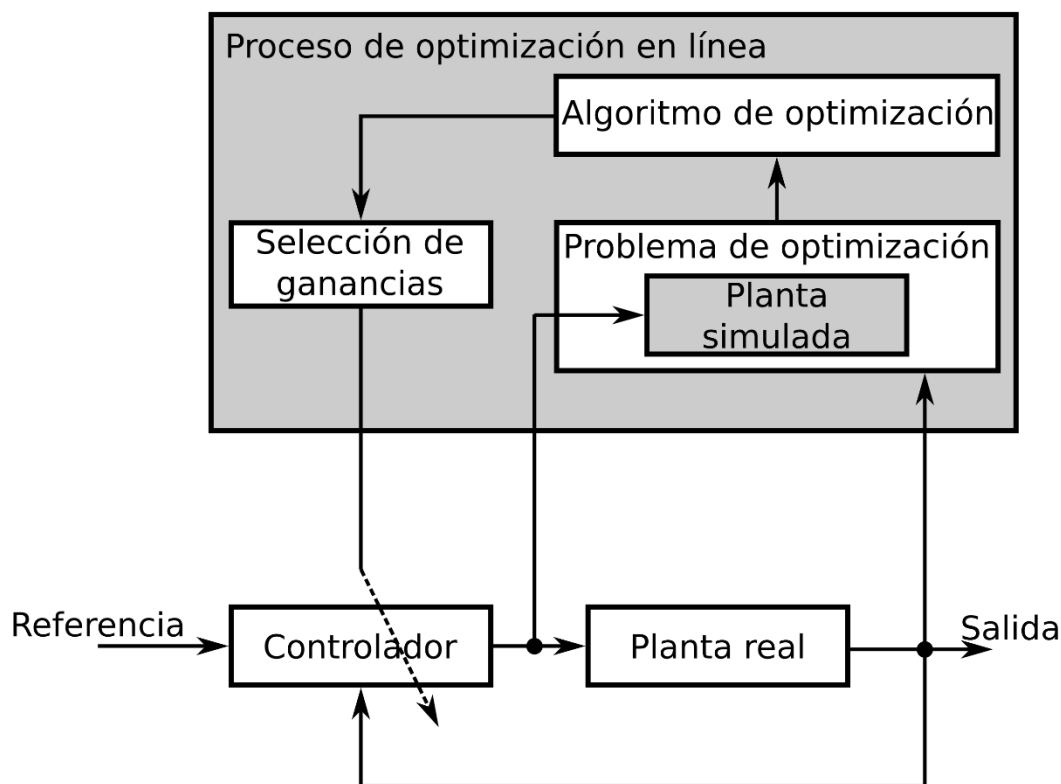


Figura 4. Representación esquemática del proceso de sintonización en línea.

1.2 Limitaciones en los métodos de sintonización

El uso de métodos analíticos de sintonización es proporcionar soluciones (valores de ganancias del controlador) en un rango de operación del sistema a controlar (en una región dentro de un espacio restringido de la planta). Debido a la naturaleza no lineal de la dinámica de la planta, estos métodos no son tan eficientes para generar un comportamiento deseado en un proceso real, ya que requiere de la intervención del humano para seleccionar las ganancias dentro de la región permitida, que en muchas ocasiones es un reto realizarla.

Por otro lado, se requiere de mucho tiempo para ajustar las ganancias del controlador en el método de sintonización heurístico, ya que es difícil considerar varios índices de rendimiento de control y así mismo, estos métodos se aplican a una clase reducida de sistemas, enfocada principalmente a plantas industriales que trabajan en un rango de operación (procesos expresados como sistemas lineales (Ogata, 2010)). En plantas complejas, en donde es importante considerar sus aspectos no lineales, este tipo de métodos puede producir resultados no deseables en el sistema de control en lazo cerrado.

En los métodos de optimización y en una clase particular de métodos adaptables (de interés en el presente documento), la sintonización del controlador se describe a través de un proceso de optimización, en donde se requiere de una representación matemática aproximada de la planta a controlar. La principal diferencia entre ambos métodos está en la forma de realizar el proceso de optimización. En el método de optimización, el proceso es *fuera de línea*, mientras que en el

método adaptable es *en línea*. Ambos métodos presentan ciertas ventajas y desventajas, y su implementación depende en gran medida de la aplicación específica para la cual se va a utilizar. Por ejemplo, en la mayoría de los controladores industriales se pueden establecer valores constantes en las ganancias del controlador; con el método de optimización resulta sencillo la implementación de estas ganancias, ya que no requiere de alguna adaptación extra en el controlador. Sin embargo, este método se afecta por incertidumbres y perturbaciones no consideradas en el proceso de optimización *fuera de línea*, de tal forma que el desempeño del controlador podría comportarse de manera diferente en una implementación en tiempo real. Para una aplicación práctica en un entorno real, se podría optar por la incorporación de términos de robustez de los índices de rendimiento de control en el proceso de optimización para reducir la sensibilidad de tales índices con respecto a cambios en las incertidumbres y perturbaciones existentes, y así mejorar el sistema de control en lazo cerrado (Serrano-Pérez et al., 2021). Esto último, hace más compleja la sintonización del controlador, pero es una forma de enfrentar el problema de incertidumbres no modeladas en el proceso de optimización.

Por otro lado, la ventaja principal del método adaptable es debido a los cambios dinámicos de las ganancias del controlador, éstos son más eficientes ante incertidumbres y perturbaciones en el sistema en lazo cerrado. Sin embargo, desde el punto de vista de implementación práctica en un entorno industrial, la aplicación real de este tipo de método de sintonización requiere de una adaptación mayor de los componentes del controlador de la planta, lo que ocasiona el paro de la planta por un mayor tiempo.

Es así que, analizando las limitaciones y ventajas de los métodos existentes de sintonización de controladores, los más prometedores son los métodos de optimización y los métodos adaptables, ya que no requiere de la intervención del humano para seleccionar las ganancias dentro de un rango de operación permitida, pueden considerar varios índices de rendimiento de control y la complejidad del sistema a gobernar puede resultar mayor en comparación con el método de sintonización analítico y heurístico.

2. Etapas del proceso de optimización para la sintonización de controladores

Optimización es el acto de obtener el mejor resultado posible bajo ciertas circunstancias (Rao, 2019). Es así, que la sintonización óptima de controladores consiste en encontrar las ganancias del sistema de control que permitan mejorar uno o varios índices de rendimiento de control considerando las restricciones involucradas en la selección de dichas ganancias.

Para llevar a cabo el proceso de optimización en la sintonización del controlador por el método de optimización y adaptable, se deben considerar los siguientes pasos. El primer paso es transcribir el problema de sintonización de controladores como uno de optimización considerando las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento real. Para realizar lo anterior, se debe describir con un lenguaje matemático, el índice de rendimiento de control por el cual se desea ser más eficiente, como por ejemplo la exactitud con la que un sistema alcanza la coordenada deseada, el consumo de energía que gasta una planta al realizar un movimiento dado, entre otros criterios de interés por el usuario. El índice de rendimiento de control es el objetivo a mejorar y por el cual se deben de seleccionar las ganancias del controlador, a este índice se le conoce también como función de desempeño o función objetivo. Así mismo, se deben establecer las restricciones inherentes al problema, como por ejemplo, se pueden definir

los límites máximos y mínimos permitidos de los valores de las ganancias del controlador, así como alguna otra variable a la que se quisiera acotar su valor. Retomando el ejemplo del acuario, la función de desempeño será el error cuadrático entre la temperatura del acuario y la temperatura deseada. Al minimizar dicho error se estará promoviendo una mejorará en las oscilaciones presentes en la temperatura del acuario (variable de salida). Las restricciones para este caso particular, podría ser que la corriente eléctrica de entrada a la planta (señal de entrada o señal de control) sea limitada a un umbral permitido en los dispositivos físicos.

Una vez establecido el problema de optimización, el segundo paso es resolverlo. Debido a que los problemas en ingeniería de control son complejos de resolver, en especial el de la sintonización de controladores, se usan estrategias numéricas (algoritmos iterativos) para resolverlo. Dentro de las estrategias para resolver el problema de optimización se encuentran aquellas que requieren el cálculo del gradiente (generalización de la derivada en funciones de más de una variable) de la función objetivo y restricciones, y aquellos que no lo requieren (Rao, 2019). En el primer caso, el gradiente de la función objetivo guía la búsqueda de soluciones y en el segundo caso la dirección de búsqueda se hace de una forma diferente. Para el caso particular de los algoritmos de cómputo evolutivo, la dirección para encontrar soluciones al problema se realiza a través de una emulación del proceso de evolución de las especies para la supervivencia del más apto, en donde a través de un algoritmo de computadora se puede abstraer los procesos principales de la evolución biológica que permitan buscar soluciones (ganancias del controlador) más apropiadas al problema de sintonización de controladores. Para el ejemplo particular del acuario, a través del proceso iterativo del algoritmo y de la forma como encuentran las soluciones al problema de sintonización de controladores, se podrán encontrar las ganancias del controlador más prometedoras en su búsqueda. La eficiencia en las ganancias obtenidas dependerá de la forma como guíe la búsqueda el algoritmo.

Una vez resuelto el problema de optimización, el tercer paso es evaluar las ganancias del controlador obtenidas en un entorno real con el propósito de observar y evaluar su comportamiento.

3. Cómputo evolutivo en el problema de sintonización de controladores

Desde 1930, la evolución natural ha sido vista como un proceso de aprendizaje y se ha relacionado con la "inteligencia" de las máquinas. La computación evolutiva (Coello et al., 2007) toma en cuenta lo anterior y estudia una clase de algoritmos nombrados evolutivos que se inspiran en la teoría de la evolución de las especies y la supervivencia del más apto para desarrollar mecanismos de búsqueda principalmente para procesos de optimización (problemas de optimización) y de clasificación.

Los algoritmos evolutivos son métodos de búsqueda estocástica, que introducen factores pseudoaleatorios y la emulación del proceso natural de evolución de las especies. Esta emulación considera tres conceptos clave: selección de padres, variación y remplazo. Estos conceptos son aplicados a un conjunto de soluciones durante el proceso evolutivo con el propósito de generar soluciones más aptas para solucionar el problema. Al conjunto de soluciones se le nombra población de individuos.

Para entender el proceso que llevan consigo los algoritmos evolutivos, la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** ilustra de manera general la forma de trabajar de estos algoritmos. Como paso inicial, se crea una población compuesta por un conjunto de individuos (soluciones potenciales al problema), tales que, posean preferentemente características diferentes entre sí (individuos únicos). Cada uno de estos individuos contendrá la información relacionada con las variables de diseño del problema de optimización. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se ejemplifica a los individuos como prismas rectangulares y cada uno de los cubos que contiene, representa la información de las variables de diseño asociada, que para el caso particular son las ganancias del controlador. Esta población, llamada población inicial, pasará posteriormente a un proceso cíclico donde los individuos evolucionarán en cada generación, es decir, en cada iteración, los individuos se adaptan al ambiente (problema de optimización), para así generar individuos más aptos (soluciones que mejor resuelven el problema), como se explica a continuación:

En la primera etapa se elige un conjunto de individuos de la población actual, llamados padres. Posteriormente, la información de los padres se combina a través de operadores de variación en donde podrían intercambiar su información mediante un operador de cruce y además podrían alterar regiones particulares de la información del individuo mediante el operador de mutación como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** El operador de mutación tiene como objetivo agregar nuevas características que pudieran ser benéficas para los individuos (aunque también pueden no serlo). Como resultado de esta etapa es la creación de individuos llamados hijos.

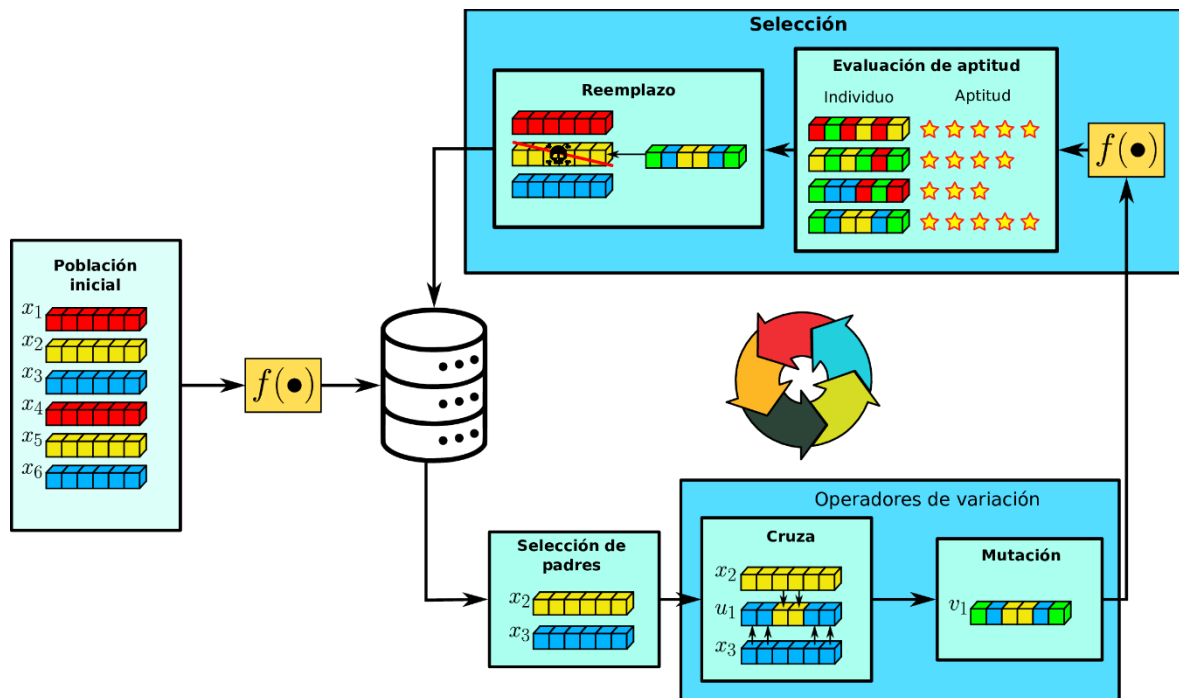


Figura 5. Proceso evolutivo para encontrar soluciones en un problema de optimización.

Una vez pasadas las dos etapas previas, tiene lugar la etapa de remplazo, donde se evalúa la aptitud (la calidad de la solución para resolver el problema) de cada individuo hijo ante el problema y finalmente, la población de padres e hijos compiten entre ellos, para definir aquellos individuos que son más aptos para continuar en el proceso evolutivo. Esto significa, que se seleccionan aquellos individuos más prometedores para resolver el problema y los peores se extinguen. Al finalizar el proceso evolutivo iterativo se tendrán soluciones más apropiadas para resolver el problema de optimización.

Debido a la naturaleza estocástica de los algoritmos evolutivos para la solución de un problema de optimización (para el caso particular de la sintonización de controladores), ya no es posible garantizar la convergencia hacia la solución óptima. Sin embargo, se ha mostrado en la literatura que estos algoritmos proveen soluciones altamente competitivas en problemas complejos, en donde las estrategias o algoritmos de búsqueda basados en el gradiente, ya no son eficientes para encontrar soluciones satisfactorias. Así mismo, debido a lo anterior, se hace necesario garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos por medio de estadística (Derrac et al., 2011), y en especial en aquellos procesos de control en donde una mala calibración de los parámetros podría involucrar un alto riesgo, como por ejemplo en la salud del ser humano.

¿Cuándo se deben de utilizar los algoritmos evolutivos?

Para resolver un problema de sintonización de controladores se recomienda que se utilicen como primera opción, estrategias de búsqueda clásica, como por ejemplo aquellas que requieren del gradiente de la función objetivo para que se pueda justificar el uso de algoritmos evolutivos. Así mismo, si se sabe de antemano que en el problema no se pueden aplicar las estrategias de búsqueda clásica porque el problema es discontinuo, o la complejidad del mismo imposibilite el cálculo del gradiente, o que la solución obtenida presente mucha variación dependiendo de la condición en donde inicie la búsqueda, entonces se podrá optar de forma inmediata por el uso de algoritmos evolutivos.

¿Cuáles algoritmos evolutivos se deben implementar?

Debido a la complejidad del problema de sintonización y a la naturaleza estocástica de los algoritmos evolutivos, no existe un algoritmo evolutivo que pueda ser eficiente en la búsqueda de soluciones (ganancias del controlador) para diversos problemas de sintonización. Por lo que se recomienda utilizar en primera instancia los algoritmos más representativos en la clase particular del problema a resolver. De acuerdo a (Rodríguez-Molina et al., 2020), (Benitez-Garcia et al., 2021), los algoritmos evolutivos más representativos en el problema de sintonización de controladores son los algoritmos genéticos y los de evolución diferencial.

5. Conclusiones

El incremento de altas prestaciones en las aplicaciones del control automático en plantas con dinámicas complejas, así como la satisfacción simultánea de diversas demandas, han propiciado un incremento del uso de técnicas de cómputo evolutivo en el proceso de sintonización de controladores. Dentro de los métodos existentes de sintonización de controladores, los métodos optimización y los métodos adaptables con el uso de herramientas de cómputo evolutivo, son los más prometedores. Sin embargo, este último es el que mejor se

desempeña bajo incertidumbres en el ambiente, pero requieren de adecuaciones más complejas en la práctica, de una capacidad de cómputo apropiada para el desarrollo del proceso en línea, así como de una garantía en su confiabilidad a través de un análisis estadístico debido a la naturaleza estocástica de las estrategias de cómputo evolutivo.

Las investigaciones relacionadas con la sintonización de controladores a través de algoritmos evolutivos proveerán un incremento en el uso de pruebas de laboratorio y de la confiabilidad en el desarrollo de sistemas inteligentes de sintonización para una implementación industrial y así como en la implementación en procesos de alto riesgo.

Por último, se invita al lector a consultar algunos trabajos del grupo de investigación relacionadas con aplicaciones en el área de mecatrónica, sobre la sintonización de controladores por medio de algoritmos evolutivos:

www.miguelgabrielvillarrealcervantes.com.

Bibliografía

- Åström, K. J., Hägglund, T., Astrom, K. J. (2006). *"Advanced PID control"*. Carolina del Norte, UDS, ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society.
- Bazaraa, M. S., Sherali, H. D., & Shetty, C. M. (2006). *"Nonlinear programming: theory and algorithms"*. Tercera edición, Nueva Jersey, USA, John Wiley & Sons.
- Benitez-Garcia, S. E., Villarreal-Cervantes, M. G., Mezura-Montes, E. (2021). "Event-triggered control optimal tuning through bio-inspired optimization in robotic manipulators". *ISA Transactions*.
- Coello, C. A. C., Lamont, G. B., Van Veldhuizen, D. A. (2007). "Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems". "Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems". Vol. 5, Segunda edición, New York, USA, Springer US.
- Derrac, J., García, S., Molina, D., Herrera, F. (2011). "A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms". *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol. 1, No. 1, pp. 3–18.
- Mendoza, M., Zavala-Río, A., Santibáñez, V., Reyes, F. (2015). "A generalised PID-type control scheme with simple tuning for the global regulation of robot manipulators with constrained inputs". *International Journal of Control*, Vol. 88, No. 10, pp. 1995–2012.
- Ogata, K. (2010). *"Ingeniería de control moderna"*. Quinta Edición, Minnesota, USA, Pearson.
- Rao, S. S. (2019). *"Engineering optimization: theory and practice"*. Quinta edición, USA, Wiley.
- Rodríguez-Molina, A., Mezura-Montes, E., Villarreal-Cervantes, M. G., Aldape-Pérez, M. (2020). "Multi-objective meta-heuristic optimization in intelligent control: A survey on the controller tuning problem". *Applied Soft Computing*, Vol. 93, pp. 106342.
- Rodríguez-Molina, A., Villarreal-Cervantes, M. G., Mezura-Montes, E., Aldape-Pérez, M. (2021).

"Adaptive Controller Tuning Method Based on Online Multiobjective Optimization: A Case Study of the Four-Bar Mechanism". *IEEE Transactions on Cybernetics*, Vol. 51, No. 3, pp. 1272–1285.

Serrano-Pérez, O., Villarreal-Cervantes, M. G., Rodríguez-Molina, A., Serrano-Pérez, J. (2021). "Offline robust tuning of the motion control for omnidirectional mobile robots". *Applied Soft Computing*, Vol. 110, pp. 107648.

Villarreal-Cervantes, M. G., Alvarez-Gallegos, J. (2016). "Off-line PID control tuning for a planar parallel robot using DE variants". *Expert Systems with Applications*, Vol. 64, pp. 444–454.

Ziegler, J. G., Nichols, N. B. (1942). "Optimum settings for automatic controllers". *Trans. ASME*, Vol. 64, pp. 759–768.