

Enjambre de Abejas para Sintonización de un Controlador PI de un Proceso Referencial

Paula A. C. Viveiros*
Frederico F. Panoeiro**
Josué L. Silva ***
Murillo F. Santos****
Marlon J. Carmo*****

*Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Leopoldina, MG, Brasil (e-mail: paula.cefetmg@gmail.com).

**Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Leopoldina, MG, Brasil (e-mail: frederico.fp@gmail.com).

***Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Leopoldina, MG, Brasil (e-mail: josue.cefetmg@gmail.com).

****Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Leopoldina, MG, Brasil (e-mail: murillo@leopoldina.cefetmg.br).

*****Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Leopoldina, MG, Brasil (e-mail: marlon@leopoldina.cefetmg.br).

Abstract: Benchmark processes are commonly found in the industrial field, presenting many times, a big difficulty to be tuned by classical control techniques. Showing that's interesting, the Bee Swarm Optimization (BSO) presents to be a way for resolving such difficulties. The BSO is a metaheuristic method that guides the search process, which is inspired by the great organizational skills of bees to collect food. Applying it to the control theory, this method uses the resulting control system of reference by PI controller. Then, this paper aims to determine the values of the proportional (K_p) and integral (K_i) gain of a PI controller for a benchmark process by developing the Bees Swarm Optimization considering the ITAE index as a performance function. The results were compared with two classical control methods widely used in industry (Ziegler –Nichols and IMC (Internal Model Control)), where its effectiveness has been validated, showing it's an interesting technique to be used in the industrial field.

Keywords: Process Control, Gain Tuning, Control of Linear Systems, Industrial Applications, Optimal Control.

Resumen: Procesos referenciales son sistemas comúnmente encontrados en el medio industrial, presentando muchas de las veces, una gran dificultad de ser sintonizados por técnicas de control clásicas. Mostrando ser una alternativa interesante, las redes inteligentes se presentan siendo un camino surtido para solucionar tales dificultades. De entre uno de los tipos está el Enjambre de Abejas, que es un método metaheurístico que orienta el proceso de búsqueda, inspirado en la gran capacidad de organización de las abejas para recoger alimentos. Aplicado en la teoría de control, el método utiliza la línea resultante del sistema de control de referencia a través de un controlador PI. Así, este trabajo tiene como objetivo determinar los valores de las ganancias Proporcional (K_p) e Integral (K_i) de un controlador PI de un proceso referencial mediante del desarrollo de la optimización por Enjambre de Abejas abordando el índice ITAE como función de rendimiento. Los resultados fueron comparados con dos métodos clásicos de control muy utilizados en la industria (Ziegler-Nichols e IMC (*Internal Model Control*)), donde su eficacia ha sido validada, mostrando ser una técnica interesante para ser empleada en el medio industrial.

Palabras clave: Control de Procesos, Identificación de Parámetros, Control de Sistemas Lineales, Aplicaciones Industriales, Control Óptimo.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de control industriales utilizan comúnmente el controlador Proporcional e Integral (PI) como estrategia de control, cuyo ámbito de aplicación llega al 95%. La sintonización del controlador PI consiste en la determinación

de sus parámetros: ganancia proporcional K_p y ganancia integral K_i (Åström; Hängglund, 1995).

La acción de control de un controlador PI es presentada en (1).

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_i}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (1)$$

Es relevante destacar que, la primera parte de (1) es la acción de control proporcional (la señal del controlador es proporcional al error $e(t)$), mientras la segunda es la acción integral (la señal del controlador es una tasa de variación relacionada al error $e(t)$) (Ogata, 1982).

Para cuantificar el error de la respuesta de un sistema en función de una perturbación, se utiliza criterios basados en la integral del error, que son IAE, IE, ISE, ITAE y ITSE (Carmo; Oliveira; Carvalho, 2012). El índice de desempeño adoptado en la red inteligente desarrollada fue el ITAE (*Integral Time of Absolute value Error*), al cual es basado en la integral del tiempo multiplicado por el error absoluto, conforme (2).

$$ITAE = \int t|e| dt \quad (2)$$

Es conveniente destacar que el criterio ITAE cambia el comportamiento dinámico del proceso, disminuyendo el sobreimpulso y el tiempo de asentamiento.

Además, serán presentados comparaciones de las respuestas del sistema controlado por dos métodos clásicos con el control ejecutado por el Enjambre de Abejas, mediante validaciones por el índice ITAE.

La mala sintonización del controlador PI es un problema muy encontrado en el ambiente industrial. Esto llevó al medio académico a empezar investigaciones dirigidas a la optimización de las ganancias de los controladores (Carmo, 2006).

Algoritmos basados en el Enjambre de Abejas son métodos muy apreciados en la ingeniería de optimización, donde se encuentran poco difundidos no que se trata en utilizarlo en la industria. Esto llevó a confección de algunos trabajos interesantes, como la creación de una sintonización óptima de un controlador PID utilizando un Enjambre de Abejas para controlar sistemas referenciales de cuarto orden (Abachizadeh; Yazdi; Koma, 2010); la sintonización óptima en tiempo real de un controlador PID para un sistema específico por medio del Enjambre de Abejas (Gao; Qi; Yin; Xiao, 2010); la simulación del control dinámico del paso de la optimización por medio del Simulink donde se evaluaba la escoja del espacio de búsqueda, o sea, en la fuente de alimentación (Alam; Kabir; Islam, 2010); entre otros.

Así, este trabajo busca ajustar automáticamente los parámetros K_p y K_i del controlador PI mediante el desarrollo de una red inteligente utilizando la técnica de Enjambre de Abejas. La utilización de esta rutina es basada en la elevada capacidad organizacional de abejas (Serapião, 2009). El algoritmo opera en un espacio de búsqueda, de acuerdo con las mejores soluciones de las ganancias del controlador PI sean seleccionadas mediante el concepto organizacional de este método.

El trabajo se divide de la siguiente forma: la Sección 2 aborda el sistema referencial a ser controlado; la Sección 3 presentará los procedimientos adoptados en el desarrollo de

la red inteligente de Enjambre de Abejas; después, en la Sección 4 son mostrados los resultados de las simulaciones del proceso controlado por la red inteligente, juntamente con las comparaciones del control clásico de Ziegler-Nichols e IMC (*Internal Model Control*); por último, la Sección 5 concluye los resultados de la implementación del método.

2. SISTEMA REFERENCIAL A CONTROLAR

El sistema referencial adoptado para ser controlado es clasificado como un proceso con características dinámicas y asimétricas, cuya función de transferencia es presentada en (3).

$$G_p(s) = \frac{100}{(s+10)^2} \left(\frac{1}{s+1} + \frac{0,5}{s+0,05} \right) \quad (3)$$

De acuerdo con Carmo (2006), un sistema con estas características generalmente tiene dinámica principal rápida con constante de tiempo igual a 1 y ganancia 1, donde posee un polo que proporciona dinámica lenta y ganancia elevada de 10.

Así, se presenta en la Fig. 1 el diagrama de bloques de la función de transferencia en bucle abierto del proceso referencial a ser controlado.

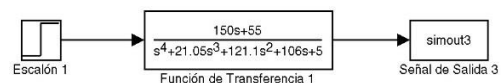


Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema al escalón unitario al bucle abierto.

La respuesta en bucle abierto del proceso referencial mostrado en la Fig. 1 al escalón unitario puede ser observada en la Fig. 2.

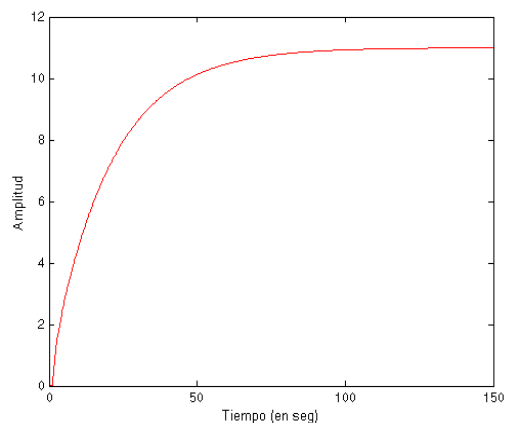


Fig. 2. Respuesta en bucle abierto del sistema al escalón unitario.

Se observa en la Fig. 2 por medio de cálculos que la respuesta del sistema al escalón unitario presenta tiempo de acomodación (T_s) próximo a 125,5 segundos, con amplitud final del señal de 11 en régimen estacionario.

3. RED INTELIGENTE DE ENJAMBRE DE ABEJAS

El tamaño del enjambre de abejas es empírico, donde se estipuló una población de veinte individuos (CS) (Carraro; Chiwiacowsky; Gómez; Oliveira, 2013). El número de abejas obreras es la mitad del tamaño del enjambre de abejas, o sea, acerca de diez ($CS/2$) individuos (Serapião, 2009). Las abejas obreras son distribuidas inicialmente en el espacio bidimensional de acuerdo con las funciones vectoriales x_i y y_i , conforme (4) y (5).

$$x_i = x_{min} - rand * (x_{max} - x_{min}) \quad (4)$$

$$y_i = y_{min} - rand * (y_{max} - y_{min}) \quad (5)$$

Donde los términos x_{min} , x_{max} , y_{min} y y_{max} son los límites inferior y superior de las funciones x_i y y_i , respectivamente.

La función aleatoria *rand* permite que sea definido aleatoriamente un valor numérico en el intervalo comprendido entre 0 y 1. Las coordenadas de cada uno de los diez individuos, o sea, las funciones x_i y y_i son definidas de i a partir de 1 hasta el último término ($N=10$), determinando así el espacio de búsqueda de las abejas obreras.

El criterio de selección de las fuentes de alimentación de las abejas obreras es hecho mediante la utilización de la función de aptitud (*fit*), al cual está relacionada al criterio ITAE, conforme (2). Por consecuencia, se implementó con la ayuda del *software* MATLAB/Simulink®, el siguiente bucle de control dispuesto en la Fig. 3.

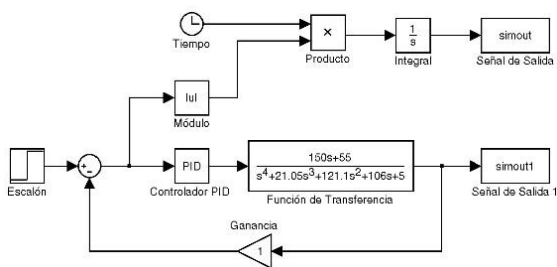


Fig. 3. Sistema referencial a ser controlado.

En el bloque PID del sistema de control presentado en la Fig. 3, es insertado los parámetros K_P y K_I por los cuales son atribuidos a las coordenadas x_i y y_i de las abejas obreras, respectivamente. La Ecuación (6) se presenta la función aptitud (*fit*) en función del error.

$$fit(i) = 1/(1 + erro) \quad (6)$$

La zona al alrededor de cada local es definida anteriormente donde es determinada por medio de la adición de un valor aleatorio positivo o negativo a las coordenadas x_i y y_i , bien como la atribución de este a los parámetros K_P y K_I , respectivamente. Es conveniente señalar que las ganancias K_P y K_I del controlador PI de las zonas al alrededor permiten la obtención del error acumulado, que culmina en una nueva función de aptitud (*fit_new*). Esta función debe tender a la unidad (1), de modo que se la función de aptitud determinada por la fuente vecina (*fit_new*) es superior que la fuente inicial (*fit*) en una posición dada, las coordenadas x_i y y_i de estas, deben recibir nuevas ganancias K_P y K_I , respectivamente.

Similarmente, la función de aptitud (*fit*) debe recibir la nueva función (*fit_new*) en este punto.

En otras palabras, si una fuente más apta de que la explorada por la partícula es encontrada, la abeja deberá moverse para este punto; por otra manera, la abeja deberá permanecer en la posición inicial.

Este criterio es aplicado a cada partícula individualmente por un límite máximo (lim_{max}) de exploración de la fuente de alimentación, que fue 10 para este trabajo.

Las abejas seguidoras son las 50% restantes de la colonia de abejas, o sea, el vector de posición resultante es definido de i empezando de ($CS/2 + 1$) hasta el último término (CS). En esta etapa, un vector fit_{soma} es obtenido por medio de la suma de las aptitudes (*fit*) de todas de las abejas obreras, conforme (7).

$$fit_{soma}(i) = \sum_{i=1}^{(CS/2)} fit(i) \quad (7)$$

El procedimiento de la Rueda de Ruleta consiste en la comparación de un número aleatorio (ruleta) y la función objetiva acumulada (fit_{soma}), donde la ruleta es obtenida por una distribución uniforme de la suma de (7), de modo que la abeja tiene una aptitud acumulada mayor que la variable ruleta sea identificada. La posición de memoria de esta abeja será utilizada para asignar las abejas seguidoras por la función *randn*. Las coordenadas de las abejas seguidoras se identifican por medio de los vectores x_i y y_i . Por lo tanto, las 10 abejas restantes también se distribuyen en el espacio de búsqueda, de modo que la solución del problema sea identificada más fácilmente.

En la etapa siguiente, la función aptitud (*fit*), los vectores de posición x_i y y_i son ordenados según la Selección por Torneo. La mejor fuente encontrada después de la ejecución del método de selección está en la primera posición de memoria de los vectores posición de las abejas obreras. En otras palabras, el individuo que posee la mejor función aptitud del enjambre es seleccionado. Después ordenarse, las abejas obreras o individuos cuya función aptitud es inferior a 10% deben abandonar las respectivas fuentes que están siendo exploradas y regresar al espacio de búsqueda. El expuesto anteriormente es hecho por la suma de la distancia de esta a la fuente cuya aptitud es la mayor del grupo a las coordenadas de las mismas, o sea, x_i y y_i .

Los individuos en las condiciones anteriores son denominados abejas recolectoras. La función para la exploración de nuevas fuentes por las abejas recolectoras es dicha por las Ecuaciones (8) y (9).

$$x_i = x_i + randn * (x_1 - x_i) \quad (8)$$

$$y_i = y_i + randn * (y_1 - y_i) \quad (9)$$

Los vectores x_i y y_i son las coordenadas en el espacio de búsqueda de las abejas recolectoras a lo largo del espacio bidimensional.

Es conveniente destacar que el algoritmo desarrollado fue realizado por un máximo de 100 ciclos (MCN), o sea, fue establecido un criterio de parada.

La Fig. 4 presenta una distribución bidimensional de las abejas del enjambre, donde los puntos en rojo son las abejas obreras, mientras los puntos azules son las abejas seguidoras.

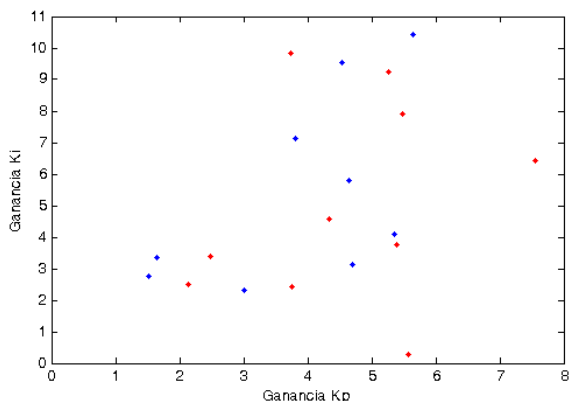


Fig. 4. Distribución de los individuos en el espacio de búsqueda.

Por la Fig. 4, se percibe una pequeña dispersión de las abejas en el espacio de búsqueda, mostrando que no existe todavía una respuesta óptima identificada.

Al discurrir del tiempo, las abejas empiezan a convergir para un determinado punto, mostrando estar próximo de encontrar una respuesta óptima. Para ilustrar esta situación, se presenta la Fig. 5.

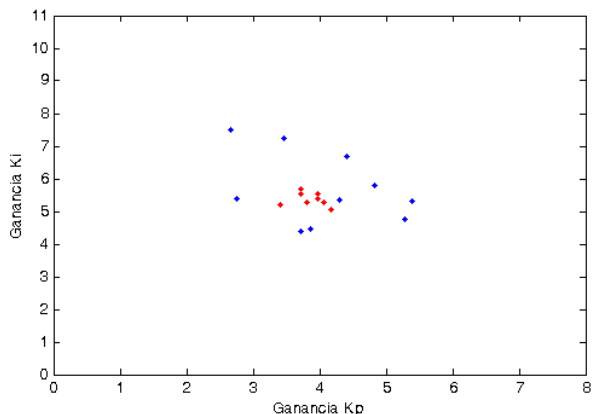


Fig. 5. Distribución de los individuos en el espacio de búsqueda.

Por la Fig. 5, se observa que las abejas obreras convergieron para un determinado punto en el espacio de búsqueda, debido a selección de la fuente de alimentación cuyo desempeño local para el individuo ser considerada satisfactoria en relación a vecindad. Esta posición de fuente de alimentación está localizada alrededor de la mejor fuente del enjambre en el espacio de búsqueda. Tratándose de las abejas seguidoras, se dice buscar regiones promisoras alrededor de la fuente del alimento del enjambre segundo su función de aptitud.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Para validación del método empleado, fue utilizado el método de bucle cerrado de sensibilidad límite de Ziegler-Nichols e IMC propuesto por Skogestad (*Internal Model Control*).

No se utilizó el primer método de Ziegler-Nichols (método de bucle abierto) pues la sintonización de las ganancias obtenida llevó el sistema a inestabilidad. Por consecuencia, fue adoptado el segundo método de Ziegler-Nichols (método de sensibilidad), donde se aumenta la ganancia K_P en bucle cerrado hasta se obtener oscilaciones mantenidas, utilizando el período y frecuencia crítica (Ziegler; Nichols, 1942).

El método clásico de control IMC propuesto por Skogestad (2004) se basa en sistemas de orden desconocida donde se puede aproximarlos para primer orden, motivado por el principio de los modelos internos.

Abajo en la Tab. 1 son presentadas las ganancias Proporcional (K_P) e Integral (K_I) para los dos métodos clásicos empleados.

Tab. 1. Parámetros de los controladores PI obtenidos por los métodos clásicos

Método	K_P	K_I
Ziegler-Nichols	6,7950	13,7504
IMC	0,1353	0,0069

Para el método clásico IMC se utilizó una constante de tiempo en bucle cerrado $\lambda = \frac{2(\tau+\theta)}{3}$, donde τ es la constante de tiempo en bucle abierto y θ el tiempo muerto (Campos; Teixeira, 2010).

Así, la respuesta controlada del proceso referencial al escalón unitario por los controladores PI de Ziegler-Nichols e IMC son presentados en la Fig. 6.

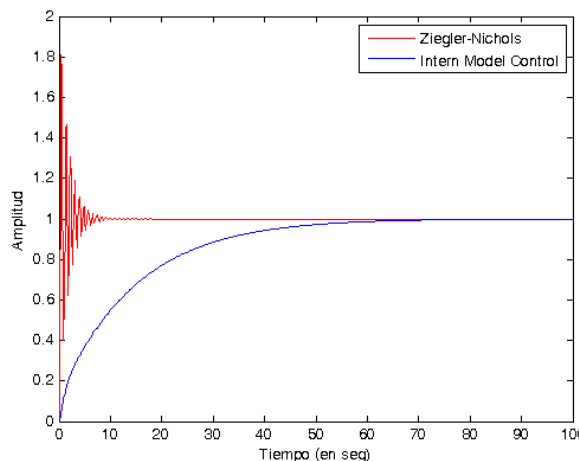


Fig. 6: Respuestas controladas del proceso referencial por el controlador PI de Ziegler-Nichols e IMC.

Por la Fig. 6, la respuesta del sistema en virtud del controlador PI de Ziegler-Nichols presentó instante de pico (T_p) de 1,5 segundos con sobreimpulso aproximado de 80%. Además, el tiempo de establecimiento fue obtenido en 24,45 segundos, sin error de régimen estacionario. No obstante, la respuesta presentada ha sido muy oscilatoria, mostrando no ser interesante en los medios industriales, pues el proceso referencial presenta dinámica de difícil controlabilidad (Carmo, 2006).

Refiriendo se a la respuesta obtenida por el método IMC propuesto por Skogestad, se observa un sistema con dinámica bastante lenta si comparada con el de Ziegler-Nichols, pero no se nota sobreimpulsos tampoco error de régimen estacionario.

Para la técnica de optimización por Enjambre de Abejas, se presenta la Tab. 2 con sus respectivas ganancias encontradas.

Tab. 2. Parámetros del controlador PI optimizado por Enjambre de Abejas

Ganancias	K_p	K_I
Valores	4,4777	5,1452

Para la validación y comparación del método de Enjambre de Abejas empleado para optimización de las ganancias del controlador PI, se presenta la Fig. 7 la respuesta controlada del sistema.

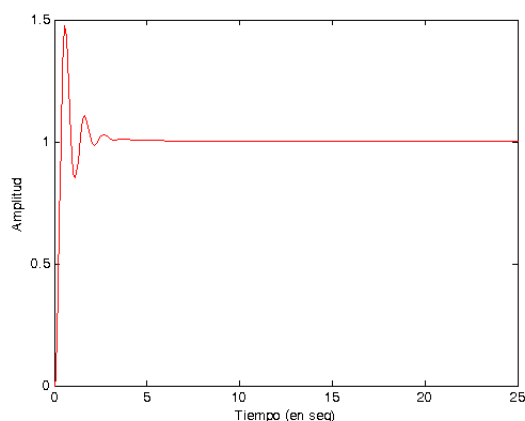


Fig. 7. Respuesta controlada del proceso referencial por el PI optimizado por Enjambre de Abejas.

La Fig. 7 muestra que el proceso referencial controlado presentó mejor desempeño que con el método de Ziegler-Nichols analizado los mismos criterios. El instante de pico (T_p) encontrado fue de 1,6 segundos, no siendo diferente de la respuesta de Ziegler-Nichols, pero cuando se observa el tiempo de acomodación, la mejoría se queda más evidente, llegando a 21,5 segundos, casi tres segundos más rápida. Otro punto interesante fue el menor sobreimpulso ocurrido, sin ultrapasar 50%, o sea, 30% menor. Se observa también que el sistema pasa a no tener muchas oscilaciones hasta se estabilizar. Cuando se compara las respuestas obtenidas por el PI del IMC con el optimizado por el Enjambre de Abejas, se observó un crecimiento más rápido de la respuesta obtenida con PI del Enjambre de Abejas, pero con sobreimpulsos no observados en la respuesta de Ziegler-Nichols.

Para que se pueda comparar cualitativamente las tres respuestas controladas, se presenta la Fig. 8 los efectos generados por los controladores PI sintonizados por Ziegler-Nichols, IMC y por Enjambre de Abejas.

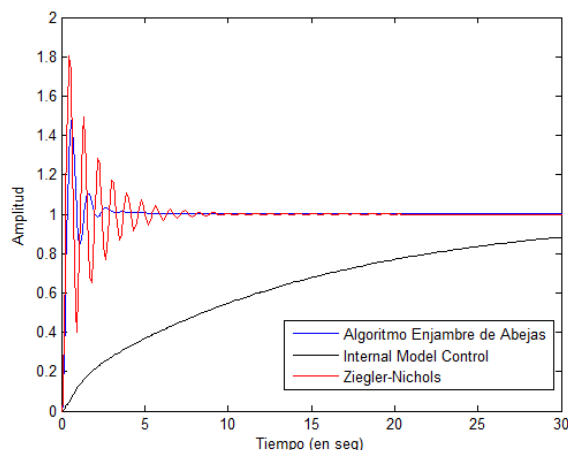


Fig. 8. Respuestas controladas del proceso referencial con controladores PI de Ziegler-Nichols, IMC y Enjambre de Abejas.

Por lo que se observó en la Fig. 8, el sistema referencial adoptado fue mejor controlado cuando el PI ha sido sintonizado por la técnica de Enjambre de Abejas, comprobando las observaciones hechas anteriormente.

Para cuantificar cuanto mejor los resueltos obtenidos por el método de Enjambre de Abejas en relación con los métodos clásicos de Ziegler-Nichols e IMC, se muestra en la Fig. 9 el índice de desempeño no intrusivo ITAE para las respuestas controladas presentadas en las Fig. 6 y 7.

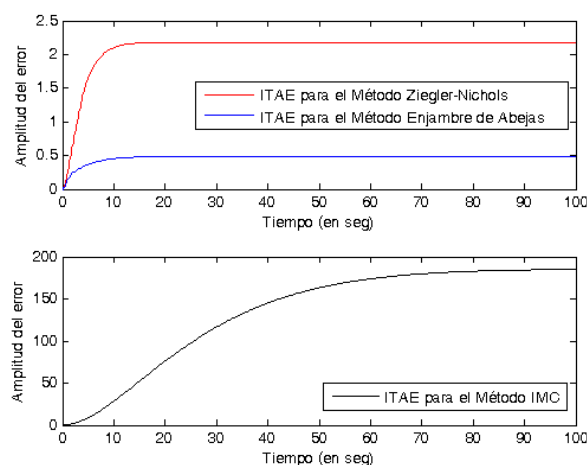


Fig. 9. Índice de desempeño ITAE para los tres métodos de sintonización de controladores PI.

Como la Fig. 9 muestra, el proceso referencial controlado por las ganancias del controlador PI por la técnica de Enjambre de Abejas ha presentado índices ITAE menores que por el método de Ziegler-Nichols. Por lo que se refiere al IMC, el índice ITAE encontrado fue nitidamente mayor que los otros dos (por Ziegler-Nichols y el optimizado por Enjambre de Abejas), debido al fato de ter presentado crecimiento lento.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo fue validada la utilización de técnicas de optimización por Enjambre de Abejas para obtención del mejor ajuste de las ganancias de controladores PI aplicados a

un proceso referencial comúnmente encontrado en el medio industrial.

El algoritmo de Enjambre de Abejas propició el ajuste óptimo de los parámetros del controlador PI (K_P y K_I) para sintonización de un proceso referencial. Por lo que se observó, la comparación con el método clásico de Ziegler-Nichols de bucle cerrado fue bien establecida por medio del índice de desempeño no intrusivo, presentando índice ITAE poco más de tres veces menor que el de Ziegler-Nichols.

Analizando los resueltos alcanzados con la sintonización por la técnica IMC, se observó respuesta más lenta que las otras, indicando también que la sintonización obtenida por Enjambre de Abejas desarrollaran mejores respuestas controladas, comprobadas por el índice ITAE.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al MEC/SESu, ENDF, CAPES, FAPEMIG, CNPq, Fundación CEFETMINAS y CEFET-MG por el apoyo al desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abachizadeh, M.; Yazdi, M. R. H.; Koma, A. Y.. (2010). Optimal Tuning of PID Controllers Using Artificial Bee Colony Algorithm. *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Montréal, Canada, 379-384
- Alam, M. S.; Kabir, M. W. U.; Islam, M. M.. (2010). Self-adaptation of Mutation Step Size in Artificial Bee Colony Algorithm for Continuous Function Optimization. *Proceedings of 13th International Conference on Computer and Information Technology*, Dhaka, Bangladesh.
- Åström, K. J.; Hägglund, T.. (1995). *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Instrument Society of America, North Carolina, USA.
- Campos, M. C. M. M.; Teixeira, H. C. G.. (2010). *Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais*. Blucher: São Paulo, Brasil.
- Carmo, M. J. (2006). *Ambiente educacional multifuncional integrado para sintonia e avaliação do desempenho de malhas industriais de controle*. Disertación de Maestría. Universidad Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, Brasil.
- Carmo, M. J.; Oliveira, A. R.; Carvalho, J. R.. (2012). Utilização de estatística como índices não intrusivos na avaliação do comportamento das malhas de controle: um estudo de caso para sistemas com atraso de transporte. *XXXIV Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional*.
- Carraro, L. F.; Chiwiacowsky, L. D; Gómez, A. T.; Oliveira, A. C. M.. (2013). Uma Aplicação das Metaheurísticas Algoritmo Genético e Colônia Artificial de Abelhas através da Codificação por Regras para Resolver o Problema de Carregamento de Navios-Contêineres. *XLV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Natal, Brasil, 1792-1803.
- Gao, F.; Qi, Y.; Yin, Q.; Xiao, J.. (2010). An Novel Optimal PID Tuning and On-line Tuning Based on Artificial Bee Colony Algorithm. *International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering*, Wuhan, 1-4.
- Ogata, K.. (1982). *Engenharia de Controle Moderno*. Prentice Hall: Rio de Janeiro, Brasil.
- Serapião, A. B. S.. (2009). Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: Uma visão geral. Unesp, *Revista de Controle & Automação*. v. 20, 271-304.
- Skogestad, S.. (2004). Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Modeling, Identification and Control*. v. 25, n 2, 85-120.
- Ziegler, J. B.; Nichols, N. B.. (1942). Optimum settings for automatic controls. *ASME Transactions*. v. 64.