

# Desarrollo de una extensión para experimentos de control adaptable usando la aplicación Control and Identification Toolbox de Android



## Colaboración

Antonio Concha Sánchez, Universidad de Colima; Suresh K. Gadi, Universidad Autónoma de Coahuila; Ramón O. Jiménez Betancourt; Luis A. Contreras Aguilar, Universidad de Colima; Néstor Lozano Crisóstomo, Universidad Autónoma de Coahuila

Fecha de recepción: 13 de marzo 2024

Fecha de aceptación: 3 de junio de 2024

**RESUMEN:** El control adaptable de sistemas es ampliamente estudiado en cursos de licenciatura y de posgrado en las ingenierías. Generalmente, la teoría vista en clase se verifica por medio de simulaciones. Sin embargo, éstas podrían no considerar perturbaciones o variables no modeladas presentes en el sistema. Por lo anterior, es preferible que el alumnado aplique los conceptos teóricos aprendidos a situaciones del mundo real mediante experimentos. Siguiendo esta idea, en este artículo se presenta el desarrollo de software de código abierto para la realización de experimentos de control adaptable por modelo de referencia. El software propuesto consiste en una extensión que se ha agregado a la aplicación Android llamada Control and Identification Toolbox (CIT), la cual permite realizar experimentos utilizando componentes asequibles y de bajo costo que consisten en un teléfono inteligente, así como en una tarjeta Arduino para la adquisición de datos. Se presentan la implementación discreta del control adaptable en la aplicación CIT, así como experimentos para el seguimiento de modelos de referencia de primer y segundo orden.

**PALABRAS CLAVE:** Adaptive control, Software development, Android app, mobile learning, control systems, hardware-in-loop.

**ABSTRACT:** Adaptive control of systems is widely studied in undergraduate and graduate engineering courses. Generally, the theory seen in class is verified through simulations. However, these may not consider disturbances or unmodeled variables present in the system. Therefore, it is preferable that students apply the learned theoretical concepts to real-world situations through experiments. Following this idea, this article presents the development of open source software for carrying out adaptive control experiments using a reference model. The proposed software consists of an extension that has been added to the Android application named Control and Identification Toolbox (CIT), which allows experiments to be performed using affordable and low-cost components consisting of a smartphone as well as an Arduino board for data acquisition. The discrete implementation of adaptive control in the CIT application, as well as experiments for tracking first- and second-order reference models, are presented.

**KEYWORDS:** Adaptive control, Software development, Android app, mobile learning, control systems, hardware-in-loop.

## INTRODUCCIÓN

En el control adaptable de sistemas dinámicos se ajustan automáticamente los parámetros de un controlador en tiempo real para hacer frente a situaciones en las que los parámetros del sistema pueden cambiar de manera significativa o no ser conocidos con precisión. Los algoritmos de ajuste automático modifican los parámetros del controlador en función de la diferencia entre la salida real del sistema y la salida deseada de un modelo de referencia [1]. El control adaptable se utiliza en una variedad de aplicaciones en tiempo real, como sistemas de control de vuelo, robótica, procesos industriales y sistemas de navegación. La capacidad de adaptarse a cambios en las condiciones operativas es esencial en estas aplicaciones.

Por otro lado, es necesario que el estudiantado conecte la teoría de control con la aplicación práctica. Para ello, algunos cursos incorporan experimentos empleando aprendizaje móvil (m-learning) mediante la integración de dispositivos móviles como tabletas y teléfonos inteligentes. Este tipo de aprendizaje permite al alumnado acceder al contenido educativo

en cualquier momento y lugar, rompiendo las barreras de tiempo y espacio, brindando flexibilidad para aprender según la conveniencia del estudiante [2].

El aprendizaje móvil se ha implementado en cursos de control automático mediante aplicaciones para teléfonos inteligentes o tabletas. Por ejemplo, [3] desarrollaron aplicaciones para dispositivos Apple, las cuales se emplearon para comunicarse con plataformas experimentales usadas para prácticas de control automático usando el regulador cuadrático lineal (LQR) o el controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Las plataformas empleadas fueron un helicóptero de 3 grados de libertad, un levitador magnético, un sistema hidráulico de dos tanques, y un motor de corriente directa (CD). Por otro lado, [4] diseñaron una aplicación Android para simular el control en lazo cerrado de un sistema masa-amortiguador-resorte empleando un controlador Proporcional-Integral (PI). También, se han diseñado las siguientes aplicaciones de Android para el aprendizaje del control automático: Control and Identification Toolbox (CIT) propuesto por [5]; Control and Identification Toolbox for motors (mCIT) presentado por [6]; y Experience Controls (EC) App descrita en [7]. La aplicación CIT se han empleado para el aprendizaje del control automático clásico mediante el controlador PID, mientras que las aplicaciones mCIT y EC también se ha utilizado para el aprendizaje del control automático moderno por medio de controladores por asignación de polos y el regulador cuadrático lineal.

En el control automático convencional se supone que los parámetros del sistema a controlar son conocidos y que no tienen variaciones. Sin embargo, es importante que el alumnado también aprenda técnicas de control no convencionales como el control adaptable ya que existen sistemas cuya dinámica puede cambiar significativamente o se desconocen sus parámetros. En este caso, el control adaptable puede ofrecer un mejor rendimiento en comparación con los métodos de control convencionales. Este hecho ha motivado la realización de este trabajo, que consiste en el desarrollo de software novedoso de una extensión que se ha añadido a la aplicación CIT para la realización de experimentos de control adaptable de sistemas dinámicos. El software desarrollado tiene las siguientes características:

- Permite el control adaptable por seguimiento de modelos de referencia de primer y segundo orden.
- Contiene una interfaz para ingresar los parámetros del modelo de referencia, así como la ganancia de adaptación del controlador adaptable.
- Presenta las gráficas y valores instantáneos de la señal de control, de los parámetros del controlador, así como del error de seguimiento y de la salida del sistema.

El artículo está organizado como sigue. La sección 2 describe a la aplicación CIT, mientras que las secciones 3 y 4 presentan experimentos de control adaptable con modelos matemáticos discretos para el seguimiento de modelos de referencia de primer y segundo orden, respectivamente.

Finalmente, la sección 4 menciona las conclusiones de este trabajo.

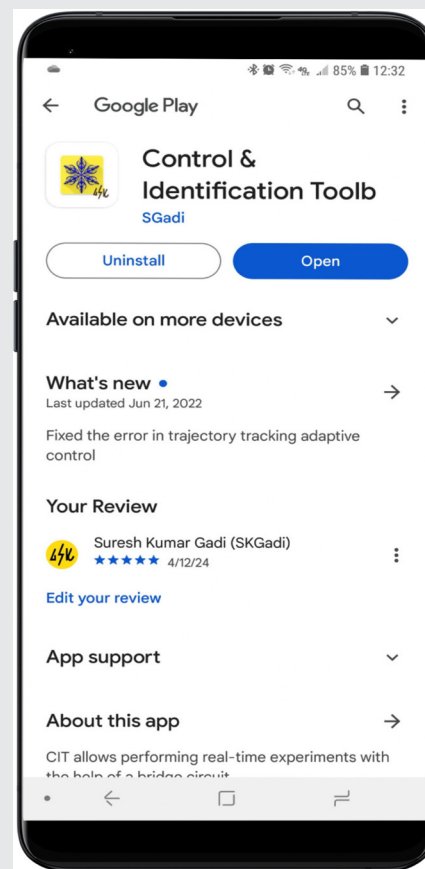


Figura 1. Icono de la app CIT.

Fuente: Captura de pantalla de Google Play Store.

## APLICACIÓN CIT

El icono de la aplicación CIT se muestra en la Figura 1, y se puede descargar en el enlace proporcionado por el código QR de la Figura 2. Además, el código fuente de la aplicación es de libre acceso y se puede descargar en el repositorio GitHub en la cuenta de [8]. Esta aplicación permite realizar experimentos en tiempo real de sistemas dinámicos de primer y segundo orden. Los experimentos se monitorean y configuran desde cualquier dispositivo Android que admita un bus serie universal (USB). La adquisición de datos se realiza a través de una placa Arduino UNO que permite una frecuencia de muestreo de hasta 500 Hz. La Figura 3 presenta la conexión entre el dispositivo Android y la tarjeta Arduino.

Por otro lado, la Figura 4 muestra el menú de la aplicación CIT, con la cual se puede realizar la identificación paramétrica de sistemas por medio del método de mínimos cuadrados. Además, la aplicación permite visualizar la respuesta de sistemas ante diferentes entradas, así como su control automático por medio del control PID. Finalmente, en la parte inferior de menú se muestra la nueva funcionalidad propuesta en este trabajo para el control adaptable por modelo de referencia. A continuación, se describe este tipo de control, así como su implementación en la aplicación CIT.



Figura 2. Código para descargar la app CIT.  
Fuente: Elaboración propia.

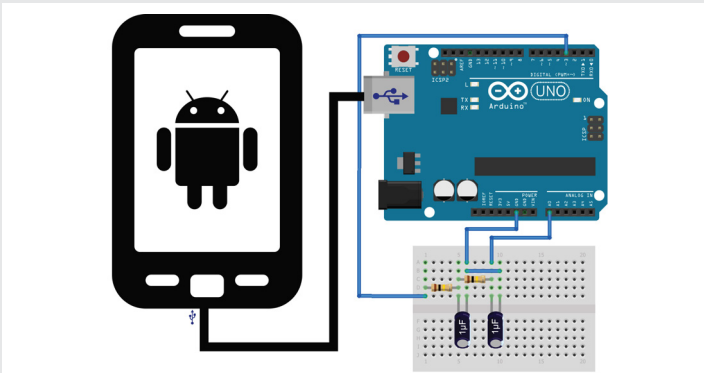


Figura 3. Conexión entre el dispositivo Android y la tarjeta Arduino.  
Fuente: Elaboración propia.

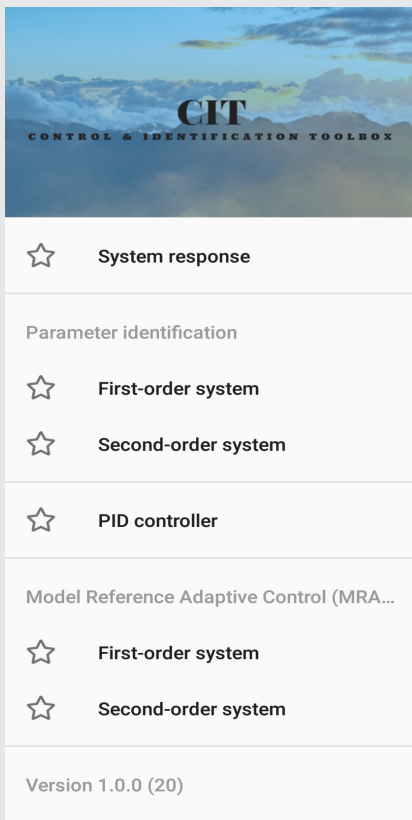


Figura 4. Menú de la aplicación.  
Fuente: Captura parcial de pantalla de CIT.

**Control adaptable para el seguimiento de un modelo de primer orden**

Sea un sistema de primer orden descrito por la siguiente expresión:

$$\dot{y}(t) = -\alpha_0 y(t) + \alpha_1 u(t) \quad \text{Ec. 1}$$

donde los parámetros  $\alpha_i, i=0,1$  son constantes positivas que se suponen desconocidas. Además,  $u(t)$  e  $y(t)$  son la entrada y salida del sistema, respectivamente. Se desea que la salida  $y(t)$  del sistema siga la salida  $y_m(t)$  del siguiente modelo de referencia:

$$\dot{y}_m(t) = -\alpha_{0m} y_m(t) + \alpha_{1m} r(t) \quad \text{Ec. 2}$$

donde  $r(t)$  es una entrada acotada para el modelo de referencia, como se observa en la Figura 5.

Defínase el error de seguimiento entre la salida del sistema y del modelo como

$$e_m(t) = y(t) - y_m(t) \quad \text{Ec. 3}$$

[9] emplearon una función de Lyapunov para demostrar que la siguiente ley de control adaptable  $u(t)$  en (4), que tiene parámetros variantes en el tiempo  $\hat{\gamma}_r(t)$  y  $\hat{\gamma}_y(t)$ , permite que el error  $e_m(t)$  converja asintóticamente a 0, es decir, que  $e_m \rightarrow 0$  cuando  $t \rightarrow \infty$ .

$$u(t) = \hat{\gamma}_r(t)r(t) + \hat{\gamma}_y(t)y(t) \quad \text{Ec. 4}$$

donde  $\hat{\gamma}_r(t)$  y  $\hat{\gamma}_y(t)$  se generan por medio de las siguientes leyes de adaptación paramétrica

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\gamma}}_r(t) &= -\varrho e_m(t)r(t) \\ \dot{\hat{\gamma}}_y(t) &= -\varrho e_m(t)y(t) \end{aligned} \quad \text{Ec. 5}$$

donde  $\varrho$  es una constante llamada ganancia de adaptación. Para que el sistema en lazo cerrado con la señal de control  $u(t)$  en (4) sea estable se requiere que la ganancia de adaptación  $\varrho$  sea positiva.

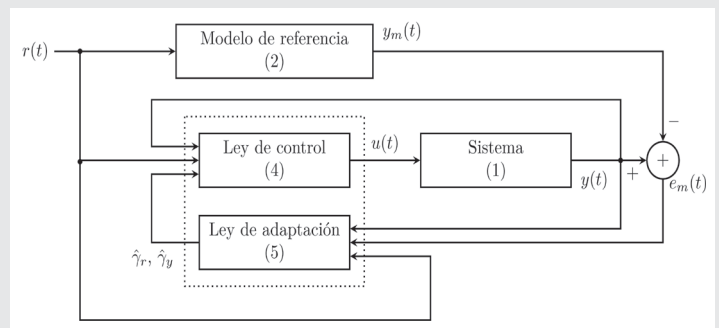


Figura 5. Control adaptable por modelo de referencia de primer orden.  
Fuente: Elaboración propia.

**Implementación discreta del controlador adaptable**

Para implementar el controlador adaptable (4) en el dispositivo Android, se tienen que discretizar tanto el modelo de referencia en (2) como las leyes de adaptación de  $\hat{\gamma}_r(t)$  y  $\hat{\gamma}_y(t)$  en (5).

El modelo de referencia en (2) se discretiza usando el retenedor de orden cero [10], obteniendo la siguiente ecuación en diferencias.

$$y_m(k+1) = y_m(k)e^{-\alpha_{0m}T_s} + \left(\frac{\alpha_{1m}}{\alpha_{0m}}\right) [1 - e^{-\alpha_{0m}T_s}]r(k) \quad \text{Ec. 6}$$

donde  $T_s$  es el periodo de muestreo.

Por otro lado, las leyes de adaptación de  $\hat{y}_r(t)$  y  $\hat{y}_y(t)$  se discretizaron usando la regla trapezoidal descrita por [10], resultando.

$$\begin{aligned} \hat{y}_r(k+1) &= \hat{y}_r(k) \\ &- \frac{T_s \varrho}{2} [e_m(k+1)r(k+1) \\ &+ e_m(k)r(k)] \end{aligned} \quad \text{Ec. 7}$$

### Experimentos con la aplicación CIT

Se realizaron experimentos con un sistema de primer orden que consiste en el filtro pasa bajas mostrado en la Figura 6, cuyo modelo matemático está dado por la ecuación (1), donde  $\alpha_0 = \alpha_1 = 1/T$ , y  $T = RC$  se llama constante de tiempo; además,  $u(t)$  y  $y(t)$  son el voltaje de entrada y salida del filtro, respectivamente. Los parámetros seleccionados del filtro son  $R = 100 \text{ k}\Omega$  y  $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$ , obteniendo así  $T = 0.1 \text{ s}$ ,  $\alpha_0 = \alpha_1 = 10 \text{ s}^{-1}$ .

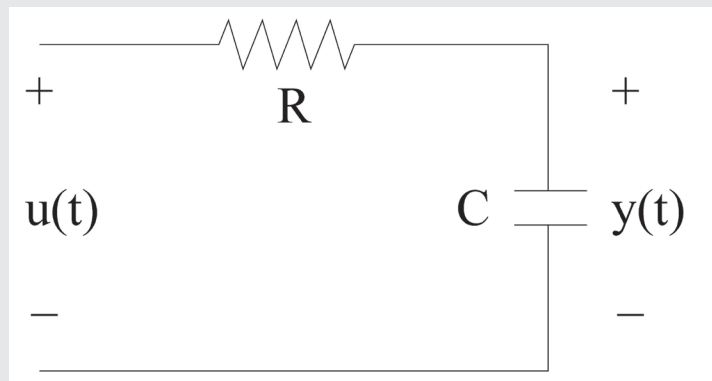


Figura 6. Filtro pasa bajas de primer orden. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7 muestra el resultado de un experimento con la app CIT, donde se programó el modelo de referencia en (2), cuyos parámetros están dados por  $\alpha_{0m} = \alpha_{1m} = 20$ . La ganancia de adaptación  $\varrho$  en (5) se seleccionó con un valor de 5. La entrada  $r(t)$  para el modelo de referencia es una señal diente de sierra, a la cual se le sumó una entrada constante de 2.5. Se observa que la salida del sistema  $y(t)$  converge a la salida del modelo  $y_m(t)$ . Además, en esta Figura se pueden apreciar los valores instantáneos y la evolución en el tiempo de las señales de error  $e_m(t)$ , de control  $u(t)$ , y de las ganancias de adaptación  $\hat{y}_r$  y  $\hat{y}_y$ , las cuales convergieron a los valores  $= 4.31 \hat{y}_r$  y  $\hat{y}_y = -3.32$ .

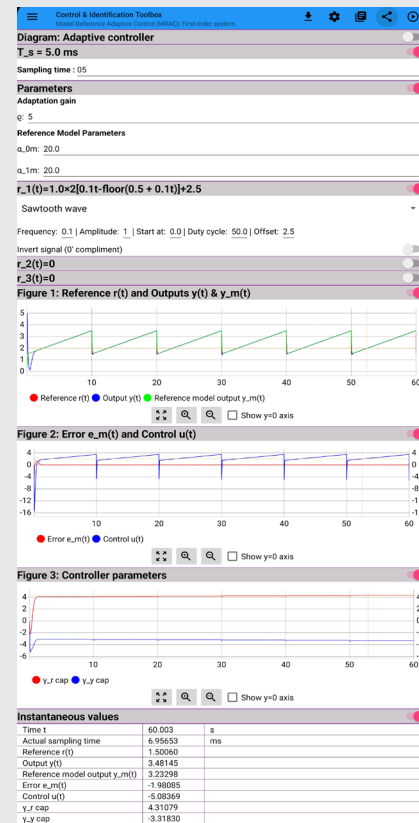


Figura 7. Experimento para el seguimiento de un modelo de referencia de primer orden.

Fuente: Captura de pantalla de la aplicación CIT.

### Control adaptable para el seguimiento de un modelo e segundo orden

Considere ahora un sistema de segundo orden dado por cuyos parámetros  $\beta_i, i=0,1,2$  son constantes positivas pero desconocidos.

$$\ddot{y}(t) = -\beta_0 y(t) - \beta_1 \dot{y}(t) + \beta_2 u(t) \quad \text{Ec. 8}$$

Defínase las variables de estado  $x_1(t) = y(t)$  y  $x_2(t) = \dot{y}(t)$ , entonces la expresión (8) se puede escribir en espacio de estados como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\beta_0 & -\beta_1 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}}_{x(t)} \quad \text{Ec. 9}$$

$$- \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \beta_2 \end{bmatrix}}_B u(t)$$

El objetivo de control es que la salida  $y(t)$  converja a la salida  $y_m(t)$  del siguiente modelo de referencia

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1m}(t) \\ \dot{x}_{2m}(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\beta_{0m} & -\beta_{1m} \end{bmatrix}}_{A_m} \underbrace{\begin{bmatrix} x_{1m}(t) \\ x_{2m}(t) \end{bmatrix}}_{x_m(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \beta_{2m} \end{bmatrix}}_{B_m} r(t) \quad \text{Ec. 10}$$

El vector de error entre el estado del sistema y el del modelo está dado por

$$\begin{bmatrix} e_m(t) \\ \dot{e}_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{1m}(t) \\ x_{2m}(t) \end{bmatrix}. \quad \text{Ec. 11}$$

Mediante una función de Lyapunov presentada por [11] se demuestra que el vector de error  $E(t)$  tiende a cero asintóticamente empleando la siguiente ley de control adaptable  $u(t)$

$$u(t) = \hat{K}_c(t)x(t) + \hat{L}(t)r(t) \quad \text{Ec. 12}$$

donde leyes de adaptación para las ganancias  $\hat{K}_c(t) = [\hat{K}_{c1}, \hat{K}_{c2}]$  y  $\hat{L}(t)$  se calculan como

$$\dot{\hat{K}}_c(t) = \gamma B_m^T P E(t) x^T(t) \quad \text{Ec. 13}$$

$$\dot{\hat{L}}(t) = \gamma B_m^T P E(t) r(t)$$

donde  $\gamma > 0$  es la ganancia de adaptación y la matriz  $P = P^T$  satisface la siguiente ecuación de Lyapunov

$$A_m^T P + P A_m^T = -I_{2 \times 2}. \quad \text{Ec. 14}$$

donde la matriz exponencial  $\exp A_m T_s$  se calcula por el método de series geométricas descrito por [12], resultando

$$\exp A_m T_s \approx \left( \left[ I - \frac{1}{8} A_m T_s \right]^{-1} \left[ I + \frac{1}{8} A_m T_s \right] \right)^4 \quad \text{Ec. 17}$$

Finalmente, las leyes de adaptación en (13) se programan usando el método de integración trapezoidal, y están dadas por

$$\begin{aligned} \hat{K}_c(k+1) &= \hat{K}_c(k) \\ &+ \gamma \frac{T_s}{2} [B_m^T P E(k) \\ &+ 1] x^T(k+1) \\ &+ B_m^T P E(k) x^T(k) \end{aligned} \quad \text{Ec. 18}$$

$$\begin{aligned} \hat{L}(k+1) &= \hat{L}(k) \\ &+ \gamma \frac{T_s}{2} [B_m^T P E(k) \\ &+ 1] x^T(k+1) \\ &+ B_m^T P E(k) x^T(k) \end{aligned}$$

### Estimación de $x_2 = \dot{y}$

La señal  $x_2 = \dot{y}$  no está disponible directamente de las mediciones; por lo tanto, es necesario estimarla para poder calcular el vector  $E$  en (18). Defínase  $\hat{x}_2$  como un estimado de  $x_2$ . La aplicación CIT proporciona tres técnicas para estimar  $x_2$ , las cuales se describen a continuación.

### Aproximación por diferencias finitas

La señal  $x_2$  se estima utilizando el método de Euler, que consiste en la siguiente ecuación en diferencias finitas.

$$\hat{x}_2(k) = \frac{y(k) - y(k-1)}{T_s} \approx \frac{dy(k)}{dt} \quad \text{Ec. 19}$$

### Filtros de media móvil

Para suavizar los componentes de alta frecuencia de la señal  $\hat{x}_2(k)$  en (19), esta señal se promedia en una ventana móvil utilizando cualquiera de los siguientes filtros: simple, acumulativo, ponderado, y exponencial, los cuales se describen en [13]. En la aplicación CIT el usuario define el tipo de filtro, así como la longitud de la ventana móvil que contiene los últimos datos de  $\hat{x}_2(k)$  que se promedian.

### Filtro lineal pasa altas

Las señales  $x_2$  e  $y$  están relacionadas por medio de la siguiente ecuación  $X_2(s) = H(s)Y(s)$ , donde  $X_2(s)$  e  $Y(s)$  son las transformadas de Laplace de  $x_2(t)$  e  $y(t)$ , respectivamente; además,  $H(s) = s$  representa la función de transferencia de la derivada del tiempo, la cual es aproximada por medio del siguiente filtro pasa altas

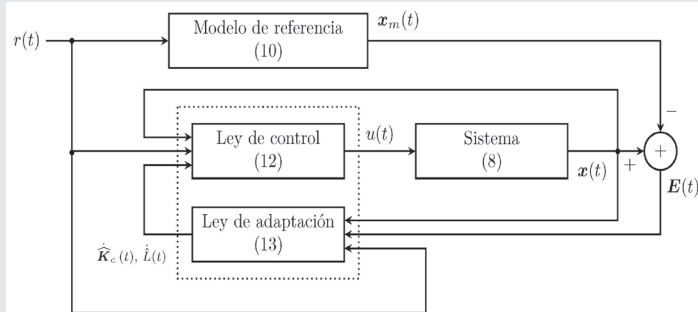


Figura 8. Control adaptable por modelo de referencia de segundo orden.

Fuente: Elaboración propia.

### Implementación discreta del controlador adaptable

En la aplicación CIT se programa el modelo en tiempo discreto correspondiente al modelo de referencia en tiempo continuo presentado en (10). Este modelo se programa usando la discretización por retenedor de orden cero y está dado por la siguiente expresión

$$x_m(k+1) = A_{md}x(k) + B_{md}r(k) \quad \text{Ec. 15}$$

con

$$\begin{aligned} A_{md} &= \exp A_m T_s, \\ B_{md} &= (\exp A_m T_s - I) A_m^{-1} B \end{aligned} \quad \text{Ec. 16}$$

$$\frac{X_2(s)}{Y(s)} = H(s) \approx F(s) = \frac{\eta s}{s + \eta} \quad \text{Ec. 20}$$

El filtro  $F(s)$  aproxima  $H(s)=s$  para frecuencias menores a  $\eta$  rad/s, la cual es la frecuencia de corte de  $F(s)$ . Aplicando la aproximación bilineal o de Tustin  $s = \frac{2}{T_s} \left( \frac{z - 1}{z + 1} \right)$  descrita por [14], es posible convertir el filtro  $F(s)$  a su versión discreta  $F(z)$  dada por

$$\frac{X_2(z)}{Y(z)} \approx F(z) = \frac{\kappa_1 [z - 1]}{z + \kappa_2} \quad \text{Ec. 21}$$

donde

$$\kappa_1 = \frac{2\eta}{2 + \eta T_s}, \quad \kappa_2 = \frac{\eta T_s - 2}{\eta T_s + 2}$$

De la ecuación (21) se deduce que la señal  $x_2$  se estima usando la siguiente ecuación en diferencias

$$\hat{x}_2(k + 1) = -\kappa_2 \hat{x}_2(k) + \kappa_1 [y(k + 1) - y(k)]. \quad \text{Ec. (22)}$$

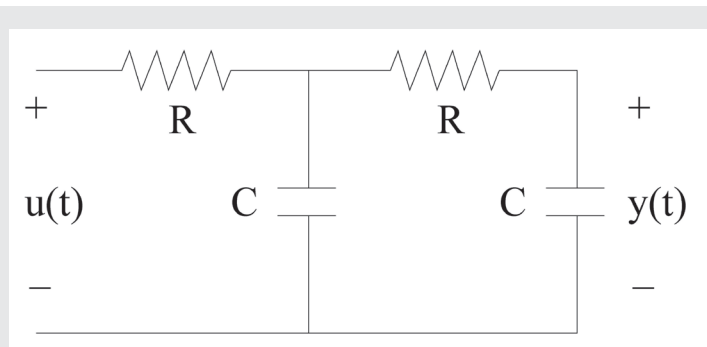


Figura 9. Filtro pasa bajas de segundo orden.  
Fuente: Elaboración propia.

### Experimentos con la app CIT

El sistema considerado para los experimentos es el filtro pasa bajas de segundo orden mostrado en la Figura 9 con  $R=100$  k $\Omega$  y  $C=1$   $\mu$ F. La conexión del filtro con la tarjeta Arduino se muestra en la Figura 3. El comportamiento del filtro se representa por el modelo matemático en (8), donde  $\beta_0=\beta_2=100s^{-2}$ , y  $\beta_1=30s^{-1}$ . El objetivo de control es que la salida  $y(t)$  de este filtro siga la salida del modelo de referencia en (10), cuyos parámetros son  $\beta_{0m}=10$ ,  $\beta_{1m}=25$  y  $\beta_{2m}=15$ . La Figura 10 muestra el experimento realizado con la app CIT, donde se programaron los parámetros del modelo de referencia, así como la ganancia de adaptación  $\gamma$  en (13), la cual se seleccionó como  $\gamma=0.5$ . La entrada  $r(t)$  del modelo de referencia es una señal sinusoidal, a la cual se le suma una señal constante de 2.5. La señal  $x_2=y$ . Se estimó mediante un filtro de media móvil simple que promedia los últimos 50 datos de esta señal. En el experimento se observa que el error de seguimiento  $e_m(t)$  tiende a cero y que la señal de control  $u(t)$  es sinusoidal. También, se puede apreciar que las ganancias de adaptación  $K_{c1}$ ,  $K_{c2}$  y  $L^*(t)$  tienen un comportamiento oscilatorio.

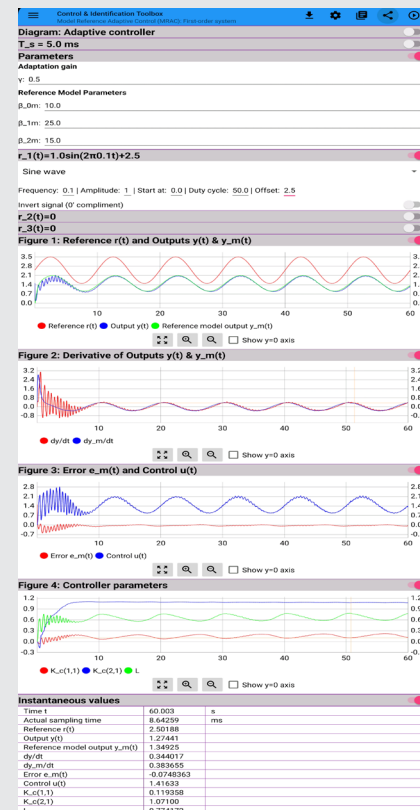


Figura 10. Experimento para el seguimiento de un modelo de referencia de segundo orden.

Fuente: Captura de pantalla de la aplicación CIT.

### CONCLUSIONES

En este artículo se propuso una extensión que se añadió a la aplicación CIT para la realización de experimentos en tiempo real de control adaptable para el seguimiento de modelos de referencia tanto de primer orden como de segundo orden. Los experimentos corroboran la teoría vista en clase del control adaptable y se pueden replicar por el estudiantado ya que la mayoría cuenta con un dispositivo Android y una tarjeta Arduino. Una gran ventaja de usar esta aplicación es que las clases de control adaptable se puede realizar de forma presencial, en línea o de manera híbrida. Además, la extensión propuesta permite al alumnado variar las ganancias de adaptación y periodo de muestreo con la finalidad de observar el comportamiento del controlador ante estos cambios. Los resultados se pueden compartir y discutir entre el estudiantado y su profesorado mejorando el aprendizaje en el control adaptable de sistemas. Como trabajo futuro en lugar de emplear una sola ganancia de adaptación para todos los parámetros del controlador, se utilizarán ganancias de adaptación independientes para cada parámetro del controlador. Además, se realizarán experimentos de control adaptable para servomecanismos utilizando el software propuesto.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONAHCYT y a PRODEP por el apoyo para la realización de este trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] K. J. Åström and B. Wittenmark, *Adaptive Control*. Courier Corporation, 2008.

[2] A. M. Al-Rahmi, W. M. Al-Rahmi, U. Alturki, A. Aldraiweesh, S. Almutairy, and A. S. Al-Adwan, "Acceptance of mobile technologies and M-learning by university students: An empirical investigation in higher education," *Educ Inf Technol*, vol. 27, no. 6, pp. 7805–7826, Jul. 2022, doi: 10.1007/s10639-022-10934-8.

[3] J. A. Frank and V. Kapila, "Development of Mobile Interfaces to Interact with Automatic Control Experiments [Focus on Education]," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 34, no. 5, pp. 78–98, Oct. 2014, doi: 10.1109/MCS.2014.2333312.

[4] L. F. Aristizábal, D. F. Almario, and J. A. López, "Development of an Android App as a learning tool of dynamic systems and automatic control," in *2014 III International Congress of Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA)*, Oct. 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/CIIMA.2014.6983438.

[5] A. Concha, D. Luviano-Cruz, G. Calderon, and S. K. Gadi, "Control and Identification Toolbox (CIT): An Android application for teaching automatic control and system identification," *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 27, no. 5, pp. 1186–1201, 2019.

[6] A. Concha, S. Thenozhi, P. Lara, R. Betancourt, and S. Gadi, "mCIT app for teaching and learning the estimation and automatic control of DC motors," *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 31, Jul. 2023, doi: 10.1002/cae.22656.

[7] "Experience Controls App," Quanser. Accessed: Apr. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.quanser.com/products/experience-controls-app/>

[8] "CIT/Bridge at master · skgadi/CIT," GitHub. Accessed: Feb. 26, 2024. [Online]. Available: <https://github.com/skgadi/CIT/tree/master/Bridge>

[9] J.-J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall, 1991.

[10] G. F. Franklin, J. D. Powell, and M. L. Workman, *Digital Control of Dynamic Systems*, 3rd edition. Menlo Park, Calif.: Addison-Wesley, 1997.

[11] P. A. Ioannou and J. Sun, *Robust Adaptive Control*. Courier Corporation, 2012.

[12] L. S. Shieh, H. Wang, and R. E. Yates, "Discrete-continuous model conversion," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 4, no. 6, pp. 449–455, Dec. 1980, doi: 10.1016/0307-904X(80)90177-8.

[13] D. M. J. de Smith, *Statistical Analysis Handbook*. The Winchelsea Press, 2018.

[14] B. C. Kuo, *Sistemas de control automático*. Pearson Educación, 1996.

