

## **AnaReg\_V1 asistente en MatLab para análisis de sistemas de regulación y ajuste de controladores en Instrumentación y Controles**

AnaReg\_V1 as MatLab aid for analyzing of regulation systems and controller tuning in Instrumentation and Controls

Henry Bory-Prevez<sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5508-0501>

Alexis Rojas-Rondan<sup>1</sup> <https://orcid.org/0009-0001-2592-0669>

Dunia Rodriguez-Heredia<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4676-7314>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Universidad de Oriente.  
Santiago de Cuba, Cuba

\*Autor para la correspondencia. Correo electrónico: bory@uo.edu.cu

### **RESUMEN**

El creciente desarrollo en la automatización de procesos tecnológicos impone que los ingenieros de procesos conozcan aspectos básicos de los sistemas de regulación automática. En el plan E de Ingeniería Química se imparte la asignatura Instrumentación y Controles para que el egresado conciba un esquema de regulación y control para un proceso tecnológico. El objetivo del trabajo es: Diseñar un software de apoyo al Tema 3 de la asignatura Instrumentación y Controles, para el ajuste de controladores bajo diferentes criterios y el análisis de los sistemas de regulación automática de tiempo continuo de procesos tecnológicos. Se diseñó el software AnaReg\_V1, el cual en la ventana principal presenta el diagrama de bloques de un sistema de regulación que sirve de interfaz para el intercambio de información, permitiendo obtener los parámetros del modelo aproximado de primer orden, ajustar controladores o reguladores de diferentes tipos bajo diferentes criterios de ajuste y graficar el comportamiento temporal de las variables del sistema de regulación. Se presenta como con AnaReg\_V1



proporcional integral según el criterio Ziegler-Nichols y el comportamiento temporal de las variables del sistema de regulación tomando como caso de estudio el control de la temperatura de un intercambiador de calor.

**Palabras clave:** diseño de reguladores; sistemas de regulación automática; procesos tecnológicos.

## **ABSTRACT**

The growing development in the automation of technological processes requires process engineers to know basic aspects of automatic regulation systems. In Plan E of Chemical Engineering, the subject Instrumentation and Controls is taught so that the graduate can conceive a regulation and control scheme for a technological process. The objective of the work is: Design a support software for Topic 3 of the Instrumentation and Controls subject, for the tuning of controllers using different criteria and the analysis of continuous time automatic regulation systems of technological processes. The AnaReg\_V1 software was designed, which in the main window presents the regulation system block diagram that serves as an interface for the exchange of information, allowing to obtain the parameters of the first-order approximate model, tuning of either controllers or regulators of different types via different adjustment criteria and graph the temporal behavior of the regulation system variables. It is presented how employing AnaReg\_V1 is obtained the approximated model, the tuning of an integral proportional controller according to the Ziegler-Nichols criterion and the temporary behavior of the variables of the regulation system taking as a study case the heat exchanger temperature control.

**Keywords:** regulator design; automatic regulation system; technological process.

Recibido: 20/08/2023

Aceptado: 15/12/2023

## Introducción

En el Plan de estudios E, en el tercer año del curso regular diurno (CRD) y en el cuarto año del curso por encuentro (CPE) de la carrera Ingeniería Química, se imparte la asignatura Instrumentación y Controles, en cuyos objetivos generales se encuentra: seleccionar, evaluar, explotar y mantener los medios técnicos de control para lograr un sistema automatizado de baja complejidad. Para cumplir con los objetivos anteriores, en el tema 3, Introducción al Control de Procesos Industriales, se tratan los criterios de ajuste de controladores de tiempo continuo.<sup>(1, 2)</sup>

La regulación de las variables de procesos químicos como: nivel, temperatura, presión y flujo están íntimamente relacionadas con la calidad del producto, los costes de producción y la seguridad del proceso. Es por esto que en el tema 3 se imparten los Sistemas de Regulación Automática (SRA) que se representan y se analizan empleando los diagramas de bloque (DB). Los bloques de los DB, para sistemas de tiempo continuo, contienen la función transferencia (FT), relación de las transformadas de Laplace de la salida a la entrada para condiciones iniciales nulas.<sup>(3, 4)</sup> Como la operación de los equipos de procesos es a partir de un punto de operación (PO), se hace necesario para aplicar la FT, que impone condiciones iniciales nulas, emplear variables de desviación (VD).

Dentro de las dificultades que surgen en la impartición de la asignatura están: la transformada de Laplace no se imparte en la carrera; <sup>(1)</sup> los estudiantes de ingeniería química presentan dificultades en el análisis de SRA empleando VD, es primera vez que reciben una asignatura vinculada a la teoría de control por lo cual no tienen una preparación previa; y los estudiantes de CPE presentan una peor situación por tener menos tiempo para recibir la asignatura. Por lo que se les dificulta analizar y ajustar controladores de tiempo continuo para procesos tecnológicos.

El plan director de computación exige que los estudiantes adquieren habilidades en el empleo de paquetes de programas profesionales que les sean de auxilio en el desempeño de su carrera y en la programación. En el Plan E y el programa analítico de la asignatura, no existe declarado el uso de algún paquete de programa profesional, esto a consideración de los autores es

una debilidad de la disciplina Fundamentos de Automatización y por consiguiente de la carrera de Ingeniería Química. Para superar esta deficiencia se propone el uso del MatLab.

Objetivo: Diseñar un software de apoyo al tema 3 de la asignatura Instrumentación y Controles, para el ajuste de controladores bajo diferentes criterios y el análisis de los sistemas de regulación automática de tiempo continuo de procesos tecnológicos.

## **Fundamentación teórica**

La automatización de los procesos industriales es una necesidad para el desarrollo científico tecnológico y económico de las naciones.<sup>(5)</sup>

El control y la supervisión de las variables de procesos son operaciones cotidianas que debe realizar el tecnólogo en tiempo real para la explotación de la planta.<sup>(6)</sup> Los ingenieros químicos, con el uso de los SRA logran estabilizar los valores de las variables de proceso a los correspondientes al PO ante múltiples perturbaciones internas o externas a la que está sometida el sistema.

La modelación matemática de los procesos dinámicos de control automático es una herramienta potente que le brinda al ingeniero químico la posibilidad, al aplicarlo, de realizar la toma de decisiones, en su modo de actuación.<sup>(6)</sup>

El autor Molina de la universidad de Matanzas, Cuba, plantea que la formación de los ingenieros químicos en Cuba transcurre en la carrera Ingeniería Química. El Plan de Estudio de esta carrera incluye la disciplina Fundamentos de Automatización (FA) conformada por tres asignaturas: Electrotecnia; Instrumentación Industrial y Control para Proceso. La asignatura de Control para Proceso se encuentra en el currículo de la formación de este profesional y su rol principal es servir de interfaz de comunicación entre el especialista en automatización y el ingeniero químico, para que este último comprenda cómo se logra el equilibrio que necesitan los procesos químicos.<sup>(5)</sup> De igual forma, en la Universidad de Oriente, esta disciplina ejerce el mismo rol, aunque comprende solo las asignaturas Electrotecnia e Instrumentación y Controles.

En <sup>(5)</sup>, se plantea que a través de la aplicación de métodos empíricos se han detectado insuficiencias en el proceso de enseñanza aprendizaje de la disciplina FA para Ingeniería Química, manifestado en los deficientes

resultados académicos y laborales de los estudiantes. Las encuestas a los profesores evidencian una opinión casi unánime que el control automático no es necesario para los ingenieros químicos. Sin embargo, las encuestas realizadas a los empleadores evidencian la importancia que éstos le dan a la modelación de procesos de control automático en la formación de este profesional. Los elementos investigados permiten concluir que se necesita desarrollar la modelación de procesos dinámicos para el control automático.

Los autores del artículo <sup>(7)</sup> plantean que el Diagrama de definición del proceso (DDP), incluye las condiciones de diseño y de operación para cada equipo, cada estación de válvula de control y equipos de alivio y tiene entre sus beneficios reconocer rápidamente las condiciones de operación y diseño inconsistentes o con conflictos. En esta etapa del trabajo tienen una notable contribución las asignaturas Instrumentación Industrial y Controles para Procesos de la disciplina FA.

La asignatura Instrumentación y Controles no solo se imparte en el pregrado como dan cuenta los artículos anteriores; en la Universidad de Alicante, en el Máster en Ingeniería Química se imparte Control e Instrumentación como asignatura obligatoria.<sup>(8)</sup>

Los autores Gonzalo y Botella de la universidad de Zaragoza plantean que para cursar la asignatura “Control de Procesos Químicos” es recomendable tener conocimientos previos de Matemáticas y haber cursado la asignatura “Sistemas Automáticos” donde el alumno aprende las bases en las que se fundamenta el control aplicado a las plantas de proceso. La asignatura de Control de Procesos Químicos se imparte en el primer semestre de cuarto curso del grado de Ingeniería Química, y proporciona al alumno conocimientos acerca de las estrategias de control que permiten garantizar la estabilidad de un proceso químico.<sup>(9)</sup>

Como se ha discutido son varias las razones que justifican la presencia de la asignatura Instrumentación y Controles en Ingeniería Química. Ahora cabe preguntar ¿qué programa profesional se recomienda para la asignatura?

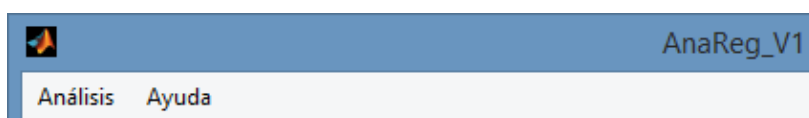
Se propone el empleo del MatLab® como asistente matemático para la asignatura por las siguientes razones: adecuado para la implementación de procesos de control automatizado por tener amplia variedad de herramientas para el procesamiento de señales, análisis de datos, simulación y modelado;



La interfaz gráfica de la ventana principal de AnaReg\_V1, se nombra AnaReg\_V1, y está compuesta por la barra de menú con las opciones: Análisis y Ayuda, una imagen con el DB típico de un SRA de procesos tecnológicos con diferentes textos editables para la entrada de datos por el usuario, y en la parte inferior derecha por los botones: Limpiar y Salir ->>.

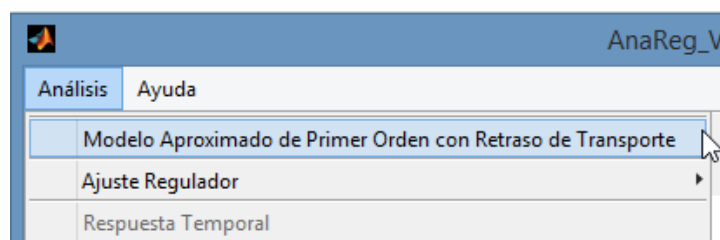
En esta versión los textos editables del valor inicial, Val. Ini., de los bloques Referencia y P Perturbación, son ajustadas a cero ya que se considera que el proceso está inicialmente operando en su PO.

La barra de Menú de la ventana principal está compuesta por: Análisis y Ayuda, como se muestra en la figura 2.



**Fig. 2-** Opciones del menú de AnaReg\_V

Al presionar con el clic izquierdo del ratón en el menú Análisis se despliegan los submenús: Modelo Aproximado de Primer Orden con Retraso de Transporte, Ajuste Regulador y Respuesta Temporal, Fig. 3. Los dos primeros submenús se activan al introducir los datos que permiten que AnaReg\_VI ejecute estas opciones.



**Fig. 3-** Submenús de Análisis

Al presionar con el clic izquierdo del ratón en Modelo Aproximado de Primer Orden con Retraso de Transporte, AnaReg\_V1 determina los parámetros de dicho modelo y abre una ventana donde muestra los valores de estos parámetros junto a una gráfica con las curvas de respuesta a un estímulo escalón unitario del modelo aproximado y de la FT producto de  $G_v(s)$ ,  $G_p(s)$  y  $H_m(s)$ .

Al presionar con el clic izquierdo del ratón en Ajuste Regulador, se despliegan los submenús con diferentes tipos de reguladores, figura 4, y al poseionar el ratón sobre uno de estos se despliega otro submenú, figura 5, que le permite al usuario seleccionar uno de los criterios de ajuste que tiene implementado AnaReg\_V1.

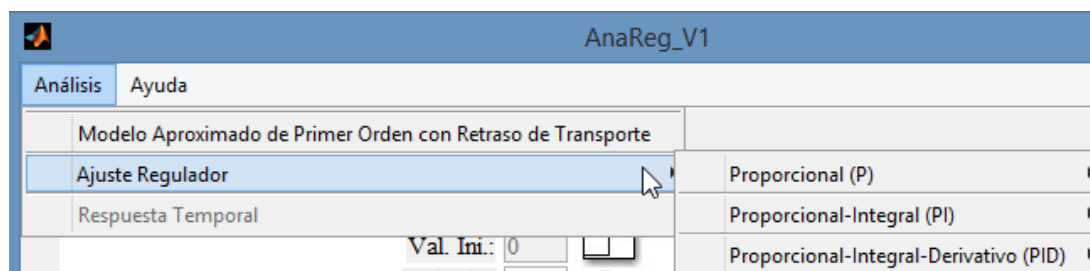


Fig. 4- Submenús con los tipos de reguladores.

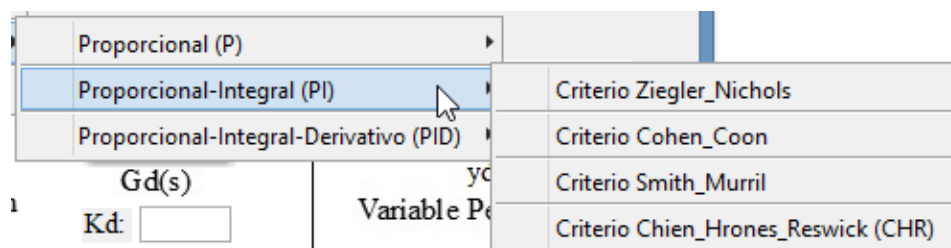


Fig. 5- Criterios para el ajuste de los reguladores

Al presionar con el clic izquierdo del ratón sobre uno de los criterios de ajuste, AnaReg\_V1 calcula el valor de cada ganancia del regulador, la proporcional, P; la integral, I; y la derivativa, D; y los muestra en los textos editables debajo del bloque nombrado Gr(s).

La última opción del menú Análisis se activa cuando se introducen datos en los textos editables del resto de los bloques que conforman el DB y al presionarla se despliega una ventana en la que se grafican las diferentes variables del SRA.

El menú Ayuda posee los submenús: Acerca de:, Descripción y Funcionamiento, que aparecen al hacer clic izquierdo sobre Ayuda, como se observa en la figura 6.



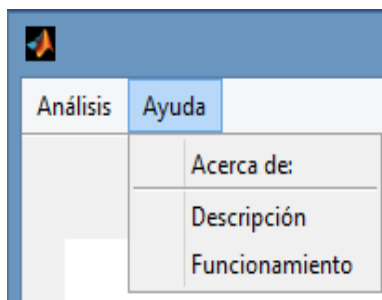


Fig. 6- Submenú de Ayuda

Al presionar con el clic izquierdo del ratón en Acerca de:, emerge una ventana, figura 7, donde aparece información acerca del programa AnaReg\_V1.

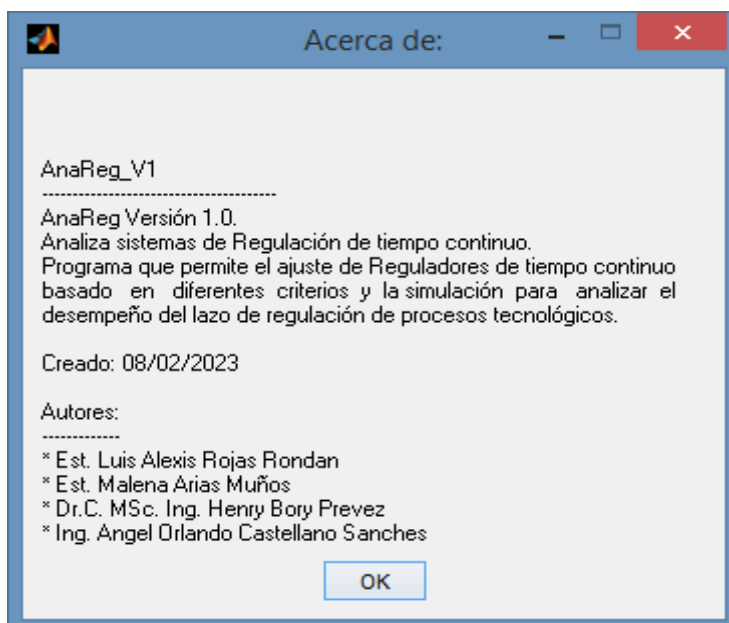


Fig. 7- Ventana Acerca de:

Al usuario presionar con el clic izquierdo del ratón sobre el submenú Descripción se abre la ventana nombrada Ayuda: Descripción AnaReg\_V1 que brinda una descripción de AnaReg\_V1, como muestra la figura 8(a). Si el usuario presiona el submenú Funcionamiento se abre la ventana cuyo título es Ayuda: Funcionamiento AnaReg\_V1, esta indica la serie de pasos que se deben seguir para emplear AnaReg\_V1, como muestra la Fig. 8 (b). A continuación, se describen los botones de la ventana de AnaReg\_V1:

- Limpiar se activa al introducir un valor numérico en cualquiera de los textos editables, sirve para eliminar los valores introducidos y que el programa

quede listo para un nuevo análisis. Este botón inactiva los submenús: Modelo Aproximado con Retraso de Transporte, Ajuste Regulator y Respuesta Temporal.

- Salir ->> este botón le permite al usuario abandonar el programa.

**Importante:** en caso que el usuario introduzca algún valor que no corresponda con el rango de definición de una variable o parámetro, el programa lo elimina del texto editable y envía un mensaje de error. En la figura 9 se muestran algunos mensajes de error a modo de ejemplo.

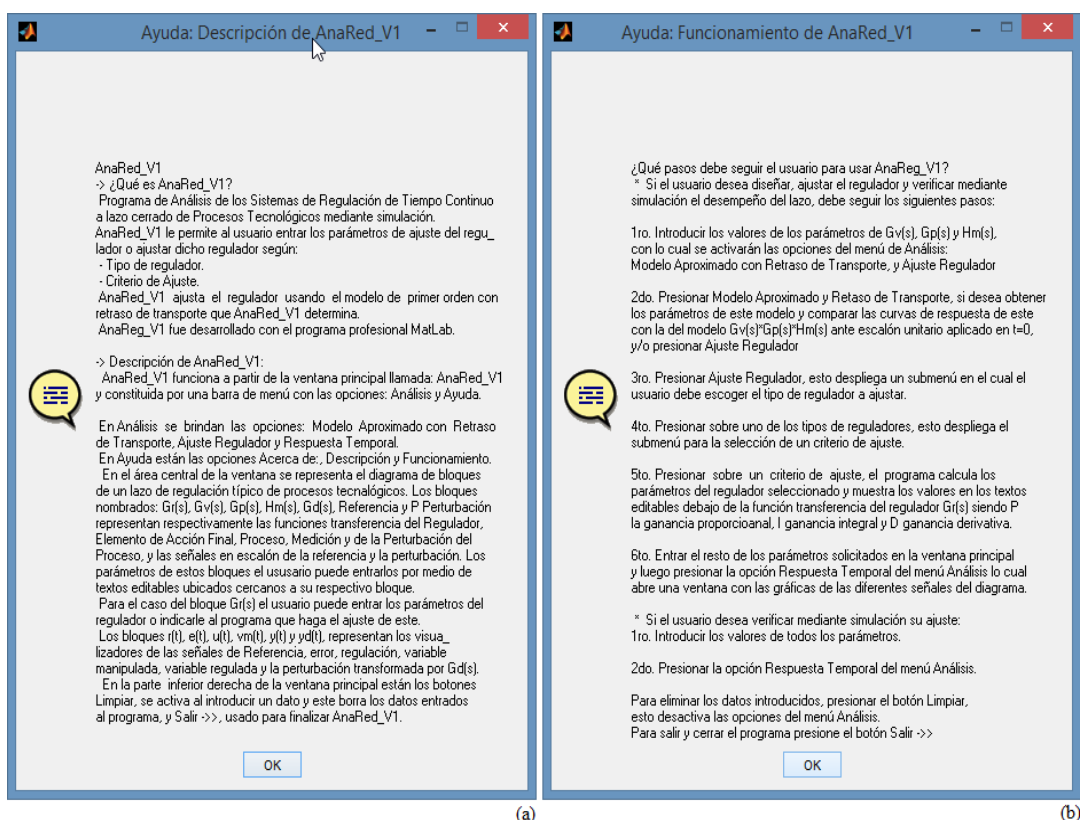


Fig. 8- Ventanas de Ayuda, (a) Descripción y (b) Funcionamiento

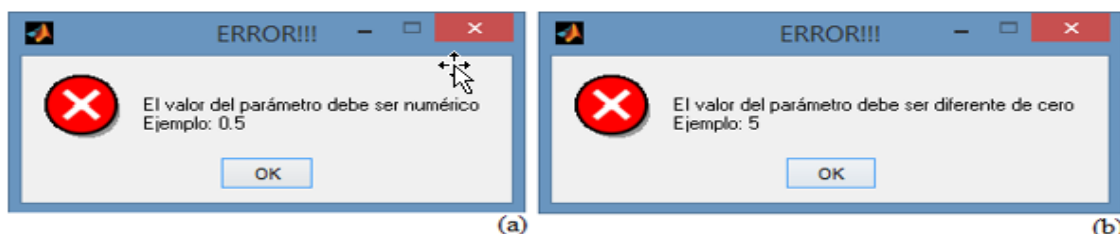


Fig. 9 -Ventanas de error: (a) cuando se introduce combinación de caracteres alfabético o alfa-numérico y (b) valores que no pertenecen al intervalo de un parámetro

## Resultados y discusión

A modo de ejemplo se presenta el uso de AnaReg\_V1 para el ajuste de un controlador y la visualización de variables del SRA empleando como caso de estudio el lazo de control de temperatura en un intercambiador de calor donde los bloques y sus parámetros son: válvula de control,  $G_v(s)$ ,  $K_v= 0.016$  (kg/s)/mA,  $T_v= 3$  s; proceso,  $G_p(s)$ ,  $K_p= 50$  °C/(kg/s),  $T_p= 30$  s; sensor transmisor,  $H_m(s)$ ,  $K_m=1$  mA/°C,  $T_m= 10$  s; <sup>(3)</sup> y se supone para la perturbación,  $G_d(s)$   $K_d=1$  °C/(kg/s),  $T_d= 30$  s. Se produce para  $t= 0$  s un cambio en la referencia de amplitud 1 y en la perturbación se supone que actúa con valor 1 para  $t= 20$  s, para obtener el comportamiento dinámico del SRA para el tipo de controlador y criterio de ajuste seleccionado.

Al introducir estos valores, se activa el menú análisis y el estudiante al presionar con el clic izquierdo del ratón en Modelo Aproximado de Primer Orden con Retraso de Transporte puede obtener los valores de los parámetros del modelo aproximado junto a una gráfica con las curvas de respuesta a un estímulo escalón del modelo aproximado y de la FT producto de  $G_v(s)$ ,  $G_p(s)$  y  $H_m(s)$  como muestra la figura 10.

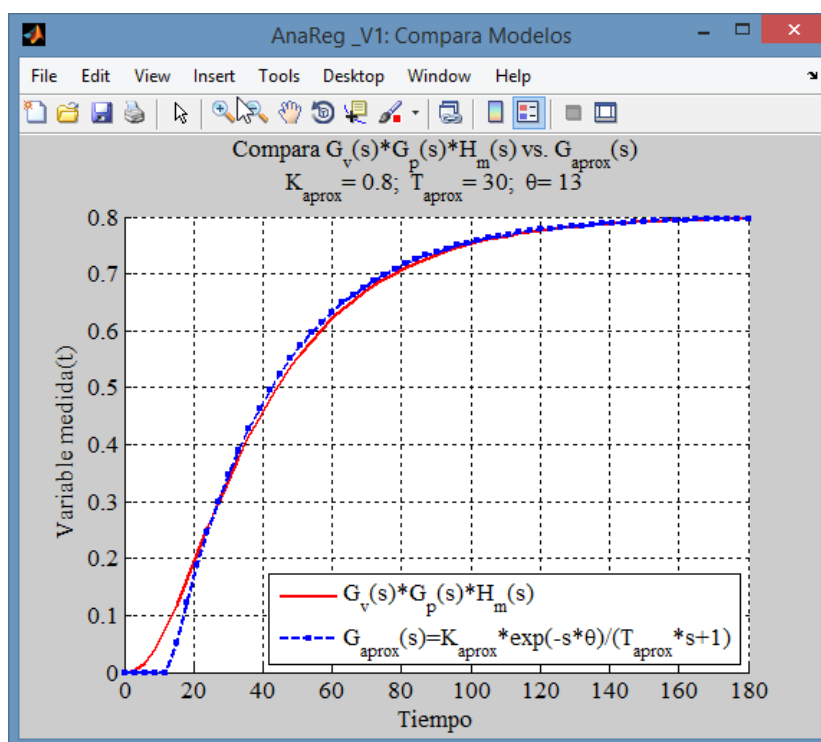


Fig. 10- Ventana con los parámetros del modelo aproximado y curvas de respuestas

En este punto el estudiante puede introducir valores de las ganancias del controlador o regulador y verificar el desempeño del SRA según su ajuste, sin obligarlo a usar los criterios de ajuste implementados en AnaReg\_V1, u obtener dichas ganancias mediante AnaReg\_V1. En este caso de estudio se realizó el ajuste con AnaReg\_V1 y se seleccionó el tipo de regulador, Proporcional-Integral, y el criterio de ajuste Ziegler\_Nichols, con lo que se obtienen las ganancias de Gr(s), quedando el SRA como muestra la figura 11.

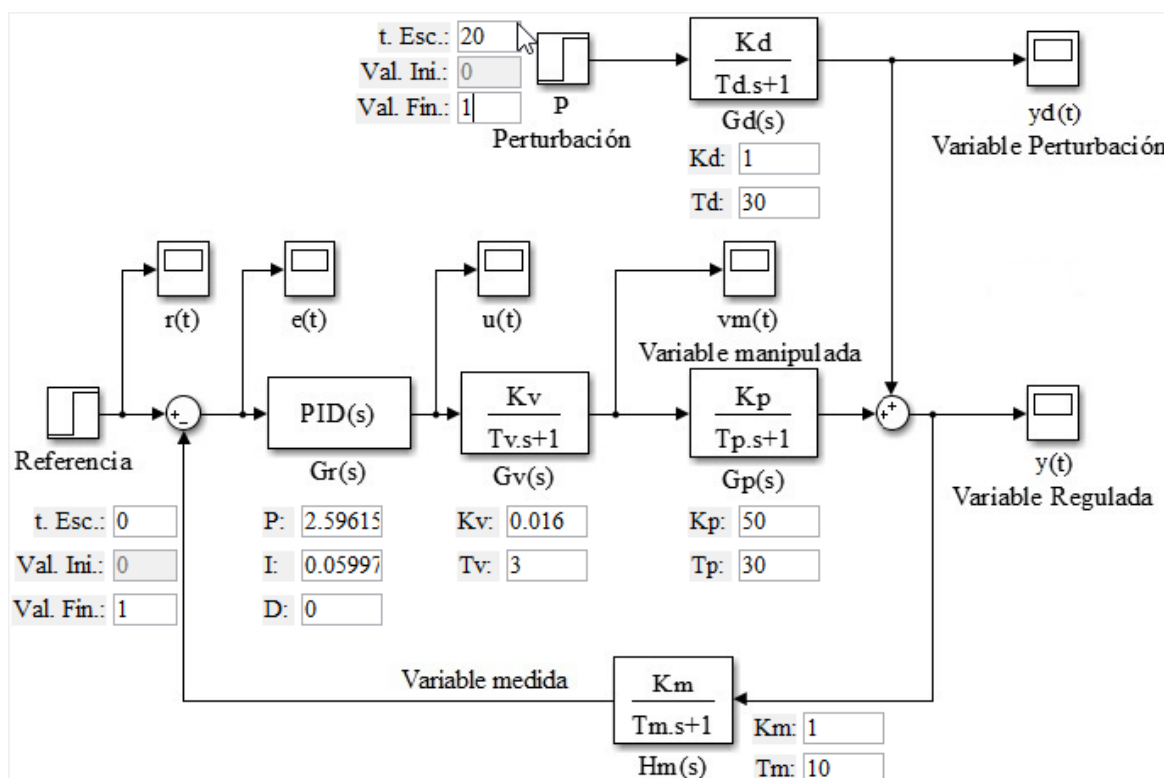


Fig. 11- Ejemplo de DB con todos sus parámetros introducidos

Debe notarse que, al obtener los parámetros del regulador, la opción Respuesta Temporal se activa, con lo cual se obtiene la respuesta temporal del SRA. Al presionar con el clic izquierdo del ratón esta opción se abre la ventana titulada AnaReg\_V1: Respuesta Temporal con las gráficas que muestran el comportamiento temporal de las variables del SRA de este caso de estudio, como se muestra en la figura 12.

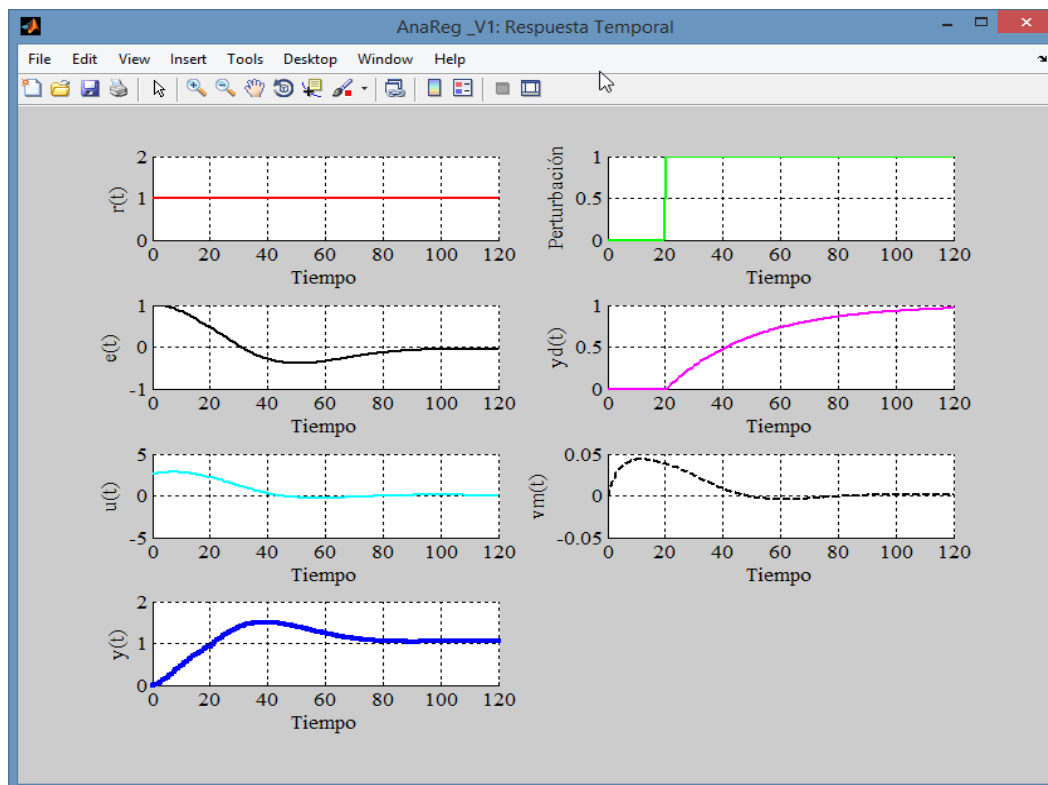


Fig. 12- Respuesta temporal del SRA

## Conclusiones

Se diseñó un software de apoyo al tema 3 de la asignatura Instrumentación y Controles que, entrada los parámetros de los bloques de un sistema de regulación automática y de las referencias y perturbación, permite:

1. Obtener los parámetros del Modelo Aproximado de Primer Orden con Retraso de Transporte, junto a las curvas de respuesta a estímulo escalón de este y de la función transferencia a aproximar, lo que facilita validar el modelo aproximado.
2. Ajustar los diferentes tipos de controladores o reguladores de tiempo continuo según los criterios de ajuste Ziegler\_Nichols, Cohen\_Coon, Smith\_Murril y Chein\_Hrones\_Reswick. Lo que facilita verificar como el tipo de regulador y el criterio de ajuste modifican el desempeño del sistema de regulación automático.

3. Graficar las curvas de diferentes variables del diagrama de bloque, lo que permite analizar el comportamiento dinámico del sistema de regulación.

## Referencias bibliográficas

1. COMISIÓN NACIONAL DE CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA. Programa de la disciplina: Fundamentos de Automatización. 2017.
2. COMISIÓN NACIONAL DE CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA. Programa Analítico de la asignatura: Instrumentación y Controles. Curso 2022.
3. SMITH, C., CORRIPIO A. *Principles and practice of Automatic Process Control*. Third Edition. Reino Unido: Wiley. 2006. ISBN: 978-04-7143-190-9.
4. OGATA, K., *Ingeniería de Control Moderna*. Quinta Edición. Madrid: Prentice Hall. 2010. ISBN: 978-84-8322-660-5.
5. MOLINA-HERNÁNDEZ, C., et al. Habilidad modelar procesos dinámicos de control automático. *Educación Química*. 2020, **32** (1). 100-111. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2021.1.75429>.
6. Weitz, D. Estrategia didáctica para la comprensión de los objetivos básicos del análisis y diseño de sistemas de control. *Revista Argentina de Enseñanza de la Ingeniería*. 2015, **4**(8), 41-50. [Consultado marzo 2021]. <https://docplayer.es/89896363-Estrategia-didactica-para-la-comprension-de-los-objetivos-basicos-del-analisis-y-diseno-de-sistemas-de-control.html>
7. HERNÁNDEZ-TOUSET, J., LEY-CHONG, N. Integración de la seguridad de procesos a la disciplina Ingeniería de Procesos en el Plan de Estudios de Ingeniería Química. *Centro Azúcar*. 2011, **38** (2). 19-27. [Consultado mayo 2022]
8. FERNÁNDEZ-TORRES, M., et al. Coordinación de Asignaturas Obligatorias en el Máster de Ingeniería Química. Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante. 2016, 1-14. <http://hdl.handle.net/10045/59064> ISBN: 978-84-608-7976-3
9. GONZALO-CALLEJO, A., BOTELLA-ABAD, L. Grado en Ingeniería Química 29930. - Control de procesos químicos, Guía docente para el curso 2013 – 2014. Universidad de Zaragoza.

10. PONCE-CRUZ, P., HERNÁNDEZ-BALBUENA, D. *Advances in Control Instrumentation Systems*. Segunda Edición. Reino Unido: IntechOpen. 2018. ISBN: 978-1-78984-013-2.
11. ROMAGNOLI, J., PALAZOGLU, A. *Dynamic Modeling and Predictive Control in Chemical Engineering: Towards Industry 4.0*. Estados Unidos: John Wiley & Sons. 2018. ISBN: 978-1-119-27493-7.
12. MYKE, K. *Process Control: A Practical Approach*. Segunda Edición. Reino Unido: Wiley. 2016. ISBN: 978-1-119-15774-8.

### **Conflicto de interés**

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses

### **Contribución de los autores**

Henry Bory Prevez: trabajó en la conceptualización del proyecto, dirigió, programó y supervisó el programa en MatLab, contribuyó con la escritura del artículo y el análisis de los resultados, realizó la revisión del documento final.

Luis Alexis Rojas Rondan: bajo supervisión, programó en MatLab, participó en la corrección de los errores iniciales, trabajo en la redacción del artículo y el análisis de los resultados y validación del programa.

Dunia Rodríguez Heredia: contribuyó con la búsqueda bibliográfica para la fundamentación de la propuesta y colaboró con la revisión del informe final