

## APLICACIÓN DE DISEÑO Y SIMULACIÓN DE DMC PARA PLANTAS DE PRIMER ORDEN CON TIEMPO MUERTO Y DINÁMICA LENTA

### *DESIGN AND SIMULATION APPLICATION OF DMC FOR FIRST ORDER PLANTS WITH DEAD TIME AND SLOW DYNAMICS*

**Norha Ligia Posada Restrepo**

Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín (Colombia)

**Jhon Alexander Ramírez Urrego y Dayron Antonio Álvarez Rodríguez**

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín (Colombia)

#### Resumen

Este artículo presenta una interfaz de diseño y simulación de controladores utilizando la teoría de control matricial dinámico, cuyo objetivo es convertirse en herramienta de enseñanza y aprendizaje de dicha técnica. Se plantean los requerimientos que se tuvieron en cuenta para el desarrollo de la interfaz y se explican los ambientes que la conforman y que permiten de forma didáctica diseñar, simular y analizar los controladores creados.

**Palabras claves:** control matricial dinámico, interfaz de diseño y simulación, programación orientada a objetos.

#### Abstract

This paper will present a design and simulation interface for controllers using the dynamic matrix control theory, which aims to become a tool for teaching and learning of this control technique. We describe the requirements that were taken into consideration for the development of the interface, and explains the different environments that make it up and which allow a didactic way the design, simulation and analysis of the results.

**Keywords:** dynamic matrix control, design and simulation interface, object-oriented programming.

## Introducción

El diseño de sistemas de control proporciona el comportamiento deseado de un proceso de acuerdo con un conjunto de especificaciones y requerimientos. Este diseño, además, debe lograr que los costos de operación disminuyan, lo cual genera un margen de ganancia económica mayor (De Prada, 2004).

Lo mayoría de los sistemas de control que se han implementado en la industria están basados en técnicas tradicionales, entre las que se destacan la dada por el algoritmo de control PID (Proporcional, Integral, Derivativo) y sus variaciones. Cerca del 95 % de los controladores implementados en la industria son PID, debido a la simplicidad matemática del algoritmo, la robustez ante perturbaciones y que la mayoría de los controladores comerciales traen programado este algoritmo, lo que facilita su implementación en procesos industriales (Alfaro, 2002; Holkar et al., 2010). En los últimos años se ha incrementado el uso de controladores del tipo predictivo basados en modelos, por ejemplo el control matricial dinámico (DMC, *DynamicMatrix Control*), que es la estrategia de control avanzado que más aplicaciones industriales tiene en la actualidad (Iglesias et al., 2006).

El diseño de dichos sistemas de control, ya sea por técnicas tradicionales o técnicas avanzadas, puede resultar extenso y complejo, por lo que surgen aplicaciones que facilitan el diseño y ajuste de ellos y además permiten simular el sistema para determinar si se cumple con las condiciones de operación esperadas; en caso de no cumplirse, se puede volver a la etapa de diseño sin involucrar gastos de funcionamiento en planta.

El propósito principal de la simulación es reproducir un sistema eléctrico, electrónico, mecánico, mecatrónico, electromecánico o de control y observar su comportamiento con respecto al tiempo, incluida la posibilidad de forzar o perturbar el sistema, sin necesidad de implementar el sistema físico, lo que brinda mayor flexibilidad al experimentar con él y permite realizar pruebas sin incurrir en los costos que implica la implementación. Es de aclarar que una vez logren los comportamientos o respuestas deseadas para el sistema que se trabaja, se debe proceder a

la implementación para validar los resultados de la simulación. Por esto surgen aplicaciones de *software* conocidas como simuladores que constituyen una poderosa herramienta para el cumplimiento de diversos objetivos de enseñanza en varias disciplinas en las que se destacan las orientadas al control de procesos industriales (Vaquero et al., 2009; Blandón et al., 2012).

Un buen ambiente de simulación es una herramienta que posibilita disminuir considerablemente el tiempo requerido para el diseño de un controlador. Además, si se diseña con programación dirigida a objetos se facilita la sintonización, graficación, comprobación y análisis del comportamiento de controladores, lo cual forma parte del éxito para la implementación de un sistema de control.

Una de las dificultades al diseñar un controlador mediante técnicas avanzadas de control, en especial las estrategias predictivas, es que carecen de un estudio profundo sobre los parámetros de sintonización. Sin embargo, dichos parámetros pueden usarse para obtener un amplio abanico de posibilidades con las que se puede cubrir una extensa gama de opciones que van desde un control estándar hasta una estrategia diseñada a la medida para un proceso en particular (Bordóns et al., 2005).

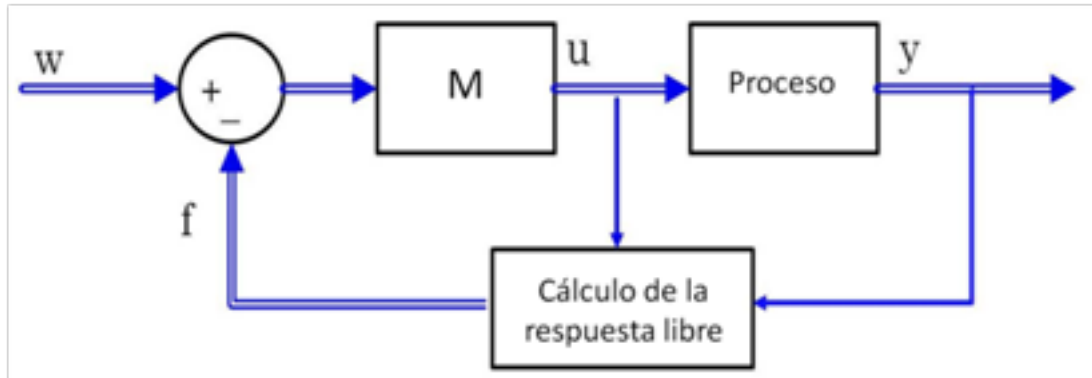
En el caso particular del DMC, ésta es una estrategia de control predictivo basado en modelos, la cual usa el principio de superposición y de la respuesta al escalón en lazo abierto para modelar el sistema y predecir el comportamiento futuro de la salida del proceso, considera sólo los N primeros términos de la respuesta del sistema, suponiendo siempre que éste es estable. Si se conoce cómo responde ante un cambio en la señal del controlador (variable manipulada), y se sabe cómo se desea que cambie la variable de proceso (variable controlada), se puede encontrar la señal del controlador necesaria para generar dicho cambio. Igualmente, si se tiene una perturbación medible que afecte la variable de proceso, se podrá encontrar la acción del controlador que anule ese cambio (Sanjuán, 1998).

En la figura 1 se presenta el diagrama de bloques simplificado de control DMC, donde (M) es una matriz de ponderación y supresión dinámica obtenida

a partir de la matriz dinámica de la respuesta del sistema ante una entrada tipo escalón, ( $u$ ) es la acción de control que se actualiza para cada instante de

tiempo, ( $y$ ) es la salida del proceso, ( $f$ ) es la respuesta libre actualizada para cada instante de tiempo y ( $w$ ) es la señal de referencia o señal deseada.

Figura 1. Diagrama de bloques DMC.



Fuente: elaboración propia.

La aplicación DMC-M se diseñó con el propósito de plantear de forma práctica la solución a los problemas de diseño y sintonización de un DMC, facilitar el cambio de parámetros involucrados en su diseño cuantas veces se desee o necesite, para permitirle al usuario observar y analizar los efectos en la respuesta del proceso. Esto posibilita que se utilice como plataforma de aprendizaje y entrenamiento en cursos teóricos de control e incluso en procesos investigativos en los que se requiera comparar y analizar el comportamiento de un proceso frente a diversas técnicas de control.

En este trabajo se presenta el entorno de diseño y simulación DMC-M (Dynamic Matrix Control Matlab), programa desarrollado en Matlab® y creado para el diseño y la simulación de controladores DMC. Además, se describe la metodología que se siguió para realizar el diseño, se muestran los ambientes que conforman la interfaz desarrollada y finalmente se plantean conclusiones.

## Metodología

El diseño de un control DMC requiere unos pasos mínimos que los debe seguir el usuario para desarrollar la estrategia y obtener los resultados de diseño. En general, dicha estrategia requiere, entre otros, un

modelo matemático, los parámetros de ajuste y un conjunto de validaciones para diseñar y simular el controlador. Sin embargo, cuando se desea cambiar un valor, ingresar otro modelo, ampliar el entorno de graficación, validar los parámetros de sintonización ingresados por el usuario, desplegar mensajes de advertencia y error, visualizar información o trabajar con bases de datos adquiridas en procesos reales, un simple algoritmo no es suficientemente práctico para satisfacer todas las exigencias mencionadas. Por esto, conocidos los requerimientos, se desarrolló el entorno de simulación DMC-M utilizando la programación dirigida a objetos y la programación estructurada de manera que satisficiera dichas necesidades y permitiera un entorno amigable y fácilmente adaptable a las necesidades del usuario. Así, la aplicación diseñada está conformada por una interfaz gráfica que permite el diseño, análisis y ajuste de controladores por matriz dinámica, estrategia de control con características intuitivas que al ser manipuladas por un simulador facilita su comprensión y aprendizaje.

Para implementar el entorno de diseño y simulación de sistemas con DMC se tuvieron en cuenta las necesidades de los algoritmos de control y lo que se espera que el *software* le presente al usuario para el análisis y selección del DMC, para lo cual se definieron las características de la aplicación por desarrollar, algunas de las cuales son:

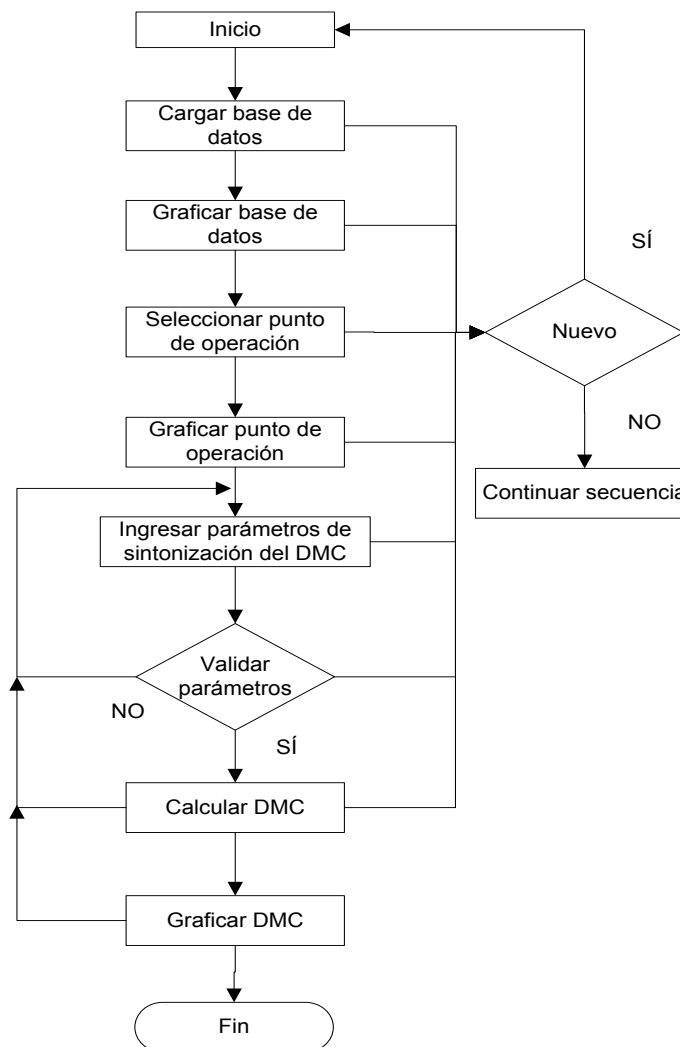
- Lectura de bases de datos que contengan la respuesta dinámica en lazo abierto del proceso para el que se diseña el DMC, ante una entrada tipo escalón. El archivo debe tener extensión .xls, .xlsx, .txt o .lvm, que son compatibles con varios *software*, entre ellos Excel® y Matlab®.
- Ingreso de parámetros necesarios para el diseño del DMC. Los valores ingresados deben ser validados de acuerdo con el tipo de parámetro, por ejemplo si es un valor de tiempo debe ser positivo y garantizar la causalidad del sistema.
- Presentar los mensajes de error o de advertencia necesarios para que el usuario los corrija o los tenga en cuenta en el análisis de los resultados.
- Presentar gráficas de los pasos del diseño del DMC, entre ellos la de los datos iniciales, la de los datos muestreados, la respuesta del DMC y las de

comparación y validación con otros controladores como PID.

- Presentar los índices de desempeño de los controladores diseñados para seleccionar el que se implementaría en el proceso.
- Ventanas de ayuda para guiar a los usuarios por el diseño del DMC.
- Posibilidad de ampliar la zona de graficación de la respuesta final de control DMC.
- Habilitar y deshabilitar los botones de acción sobre la barra de herramientas de acuerdo con el diagrama de flujo, de manera que se facilite el diseño para el usuario.

En la figura 2 se presenta el diagrama de flujo simplificado para la aplicación desarrollada.

Figura 2. Diagrama de flujo.



Fuente: elaboración propia.

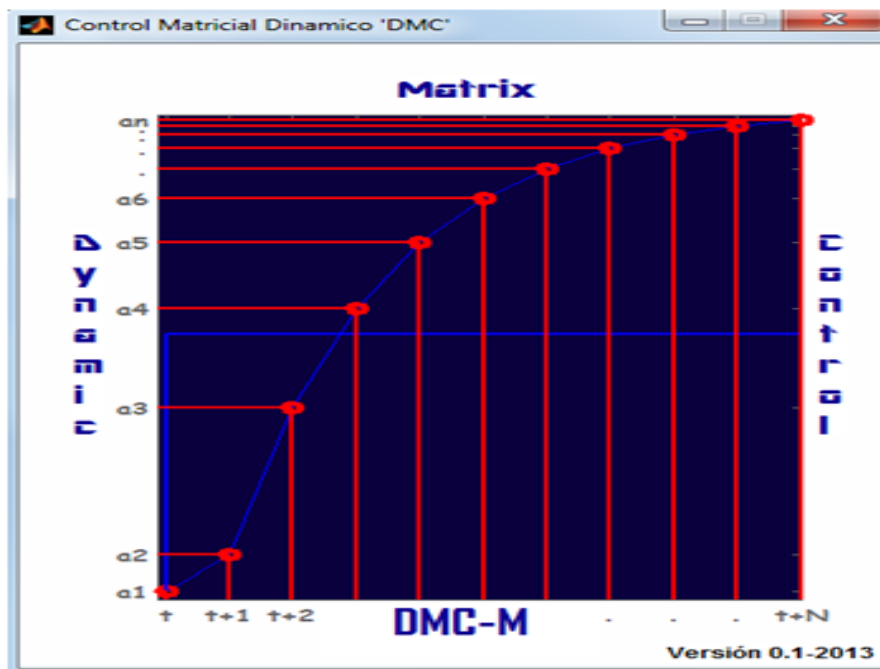
Uno de los elementos claves al realizar la aplicación es la selección del *software* que se utilizará. Actualmente se encuentran disponibles diversos *software* de programación para el diseño de simuladores, entre ellos Matlab® LabView®, Octave®, Mathematica® y Scilab®, que se diferencian entre sí por la codificación pero en general se usan con fines de investigación, de diseño y educación en ingeniería. De ellos, Matlab® ha resultado ser una muy buena opción debido al potente entorno gráfico que permite el diseño de interfaces amigables, lo que facilita la interacción con el usuario. Además, es un *software* de programación de alto nivel que posibilita la programación estructurada orientada a objetos, y así mismo la programación mediante funciones; posee un entorno de graficación muy completo y puede ejecutar cálculos matemáticos complejos,

(Gómez, 2009), por lo cual la aplicación de diseño y simulación se desarrolló en Matlab®.

## Resultados

La aplicación DMC-M no requiere ningún tipo de instalación propia ya que se activa desde Matlab® mediante la ejecución del archivo de cabecera DMC\_M.m, que se encarga de invocar las funciones correspondientes a la solicitada (programación estructurada). Al ejecutar este archivo se presenta la interfaz del programa (figura 3), una animación que captura muestras del sistema cuando éste se somete a un estímulo tipo escalón, e invoca el principio de modelado del proceso que se usa en esta estrategia de control.

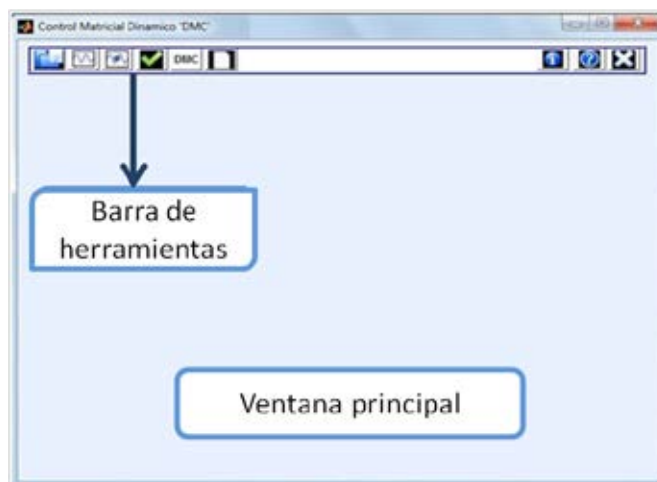
Figura 3. *Software* DMC-M



La interfaz que se muestra en la figura 4 está compuesta por un amplio espacio en el que se presenta la evolución del diseño y la simulación del controlador DMC. Esta interfaz se diseñó de manera que el usuario se adapte fácilmente a la

aplicación. Para esto, en la parte superior de esta ventana se ubicaron nueve (9) botones de acción, los cuales se habilitan a medida que se cumple el diagrama de flujo propuesto para la aplicación (figura 2).

Figura 4. Ventana principal, DMC-M.










Con el fin de conservar un entorno amigable con el usuario, aprovechando las propiedades de los objetos programados, se presenta una descripción resumida de la acción que se realiza con cada botón cuando se ubica sobre él el puntero del *mouse*. En la tabla 1 se describe la acción de cada uno de los botones y la que se realiza cuando se presionan.

### Interfaz de diseño y simulación

En la figura 5 se presenta la interfaz de diseño y simulación de un DMC para un proceso sobre el cual se realizaron tareas de adquisición de datos. La opción de cargar una base de datos entrega la información de la respuesta del sistema o proceso para el que se diseña el controlador. En ella se encuentra almacenada la información de la respuesta del sistema ante una entrada tipo escalón. La base de datos se puede generar por *software* o como resultado de un proceso de adquisición de datos en la planta física. La aplicación está diseñada para trabajar con plantas cuya respuesta se pueda modelar como un sistema de primer orden con tiempo muerto y cuya dinámica sea lenta.

Tabla1. Botones de acción DMC-M.

Botón	Nombre	Acción
	Cargar base de datos	Abre una base de datos y la presenta en pantalla.
	Graficar base de datos	Grafica la base de datos previamente cargada.

	Seleccionar punto de operación	Despliega una lista de selección para el punto de operación de 0 a 100 %
	Graficar punto de operación	Grafica el punto de operación seleccionado por el usuario.
	Diseñar DMC	Prepara el espacio de graficación y presenta en pantalla un panel con los parámetros de sintonización.
	Nuevo	Limpia y borra la ventana principal.
	About	Presenta interfaz inicial
	Ayuda	Abre un archivo .pdf con el manual de la aplicación.
	Salir y cerrar aplicación	Cierra la aplicación.

Los botones de la tabla 1 se activan conforme se avanza en el diseño del controlador, y se presentan en la interfaz los siguientes resultados: visualización de datos de forma numérica, gráfica de la base de datos cargada, selección del punto de operación, gráfica de la respuesta del sistema en el punto de operación seleccionado, zona destinada para el usuario en la que ingresará parámetros de sintonización. Los valores se pueden cambiar en cualquier momento

y tantas veces como se desee hasta que se logre el comportamiento deseado.

El botón de diseñar DMC genera la identificación del sistema, la gráfica de la respuesta del sistema en lazo abierto (sin control), la respuesta final del sistema controlado incluida la referencia, la salida del sistema, la salida predicha y la ley de control calculada por la aplicación, así como los índices de desempeño utilizados para el análisis del comportamiento del sistema ante el controlador diseñado.

Una de las ventajas del desarrollo de este tipo de aplicación es poder cambiar los valores de sintonización ya que esto facilita el análisis del comportamiento del controlador en especial para los parámetros de ponderación y supresión del DMC, los cuales pueden tomar diversos valores para cada tipo de sistema sin ningún tipo de ecuación que permita elegirlo, debido a la característica intuitiva del control DMC (Bordons et al., 2005).

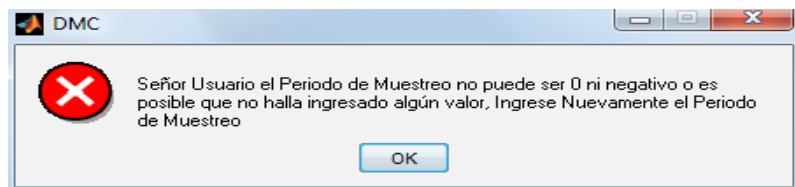
Otros parámetros que se pueden modificar para ajustar el diseño de los controladores son el periodo

de muestreo, los instantes de ejecución, el horizonte de control y el número de muestras de la respuesta al escalón que se usaran para el diseño. La variación de estos parámetros brinda un abanico de posibilidades que generan múltiples controladores que presentan desde respuestas suaves hasta comportamientos agresivos e indeseados. Para cada cambio se debe validar la información. La gráfica de respuesta al escalón y del controlador se actualiza siempre que se realiza un nuevo ajuste.

En esta misma interfaz se le da al usuario la posibilidad de ampliar las gráficas (hacer *zoom*) de respuesta del sistema controlado, para que pueda realizar así un análisis gráfico del desempeño del sistema, y determinar si continúa con el análisis numérico dado por índices de desempeño o si realiza un rediseño modificando algún parámetro de los mencionados (figura 5).

Además, DMC-M valida los datos que el usuario ingresa y si no son acordes con la teoría de diseño presenta mensajes de error como el que se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Mensaje de error.

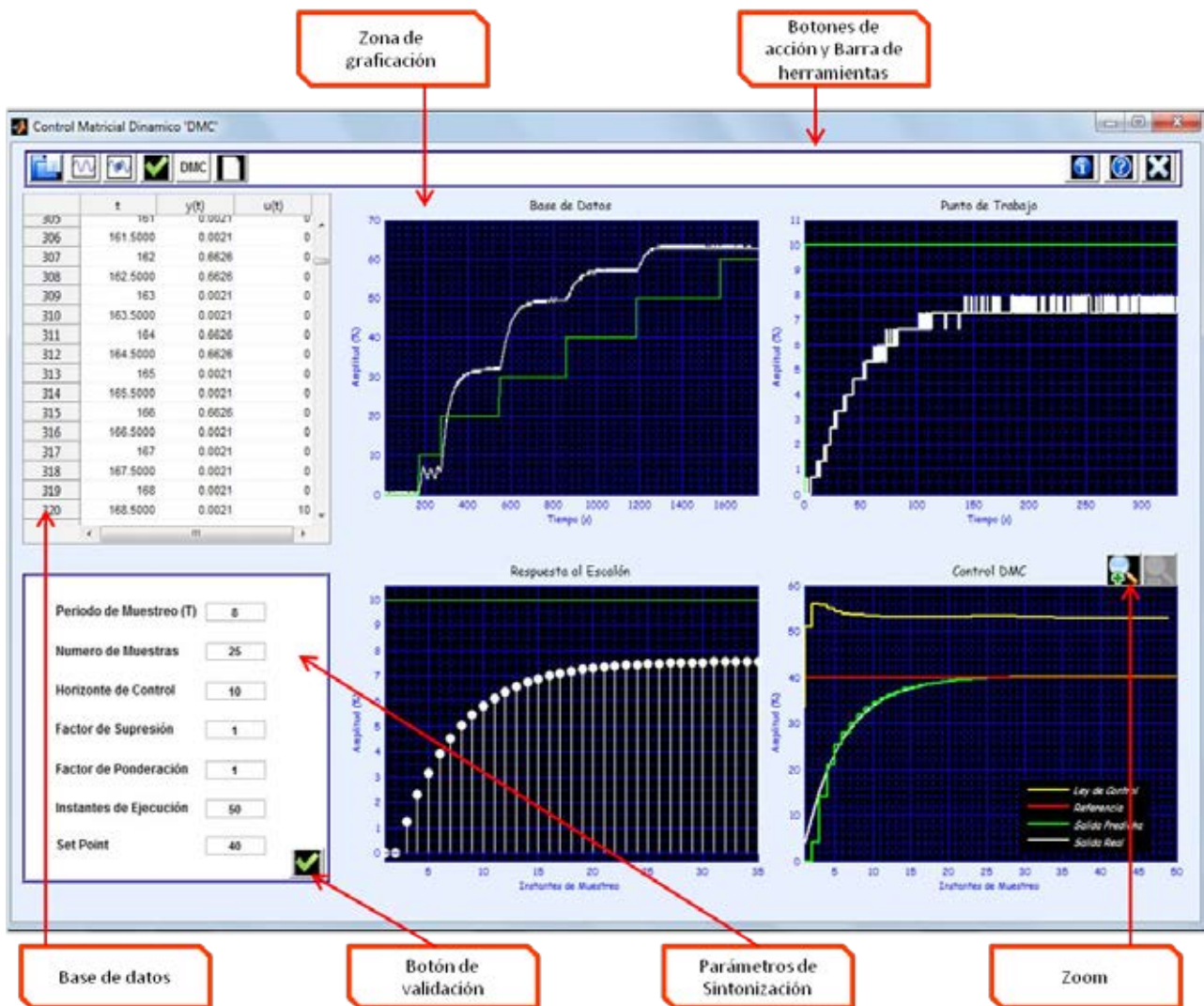


Para el análisis numérico el usuario cuenta con la ayuda de los índices de desempeño que entrega el *software*, ellos son: máximo sobreimpulso (MP, *MaximumPercentovershoot*), tiempo de establecimiento (ts, *Settling Time*) trabajo realizado por la variable manipulada TVM, y criterios de la integral del error como IAE (*Integral of the Absolute Error*), ISE (*Integral Square Error*), ITAE (*Integral Time Absolute Error*), ITSE (*Integral Time Square Error*) y error en estado estable (ESS, *SteadyState Error*), ver figura 7, (Ogata, 1996; Smith et al., 1997; Dorf, 2005).

Figura 7. Índices de desempeño.

	Alfa=1	Alfa=2	Alfa=3	PI Rapido	PI Moderado	PI Lento
IAE	112.7723	106.7071	104.7257	170.2343	177.7308	187.0548
ISE	2910.5526	2644.754	2614.1729	3818.5454	4430.7807	4978.4734
ITAE	282.308	294.5205	284.5692	710.5737	719.6799	675.2399
ITSE	1944.9847	1574.3012	1433.7808	5288.2	6836.7923	7580.8686
TVM	788.5577	803.6779	812.648	1151.2909	1145.8214	1134.7786
ts [s]	156	144	120	192	204	209
MP [%]	2.4	4.03	4.03	18.89	28.8	23.85
ess	0	0	0	0	0	0



Figura 5. Interfaz detallada del diseño y simulación de un DMC, *software* DMC-M.

## Conclusiones

Se desarrolló un *software* para diseñar y simular controladores DMC para plantas de primer orden más tiempo muerto con dinámica lenta, aplicación que permite observar el comportamiento del sistema controlado, la simulación y su análisis. Diseñado con una interfaz amigable, el usuario puede navegar por una secuencia práctica que le facilita obtener los parámetros del controlador DMC y conocer su comportamiento mediante gráficas en función del tiempo hasta lograr un control personalizado para el sistema objetivo.

La aplicación presenta información gráfica y numérica para el análisis de los resultados y la selección del controlador por implementar.

La aplicación se desarrolló con el propósito de que el usuario interactuara con ella fácilmente; para esto cuenta con botones de ayuda y mensajes de advertencia y de error que lo guían en el proceso de diseño y simulación.

El desarrollo se elaboró mediante funciones, lo que permitirá, en etapas futuras, adicionar estrategias de control o elementos de análisis que trabajen sobre el mismo entorno, lo cual amplía las opciones de trabajo en el ambiente académico e investigativo.



## Referencias

---

- Alfaro, V. M. (2002). Ecuaciones para controladores PID Universales. *San José, Costa Rica, 12* (1,2), pp. 11-20.
- Blandón A., J. C., (2012). Bio-Route: un simulador para redes de sensores inalámbricos. *Revista Educación en Ingeniería, 7*(13), pp. 23-31.
- De Prada, C. (2004). El futuro del control de procesos. Universidad de Valladolid, *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 1*(1), pp. 5-14.
- Dorf, R. C., Bishop, R. H. (2005). *Sistemas de control moderno* (10.ª ed.). Madrid: Pearson Educación, S.A.
- Gómez, J. C. (2009). Toolbox didáctico para el diseño y análisis de sistemas de control lineal. *Revista Educación en Ingeniería, 8*, pp. 155-169.
- Holkar, K. S. & Waghmare L.M. (2010). An overview of model predictive control. *International Journal of Control and Automation, 3*(4), pp. 47-63.
- Iglesias, E. J., Sanjuán, M. E., Smith, C. A. (2006). Tuning equation for dynamic matrix control in siso loops. *Ingeniería y Desarrollo, 19*, pp. 88-100.
- Bordons, C. & Rodríguez, D. (2005). Apuntes de Ingeniería de Control. Universidad de Sevilla.
- Sanjuán, M. E. (1998). Control matricial dinámico. Fundamentación y estrategias de implementación. *Revista Ingeniería & Desarrollo, 3*(4), pp. 85-92.
- Smith, C. A. & Corripio, A. B. (1997). *Principles and Practice of Automatic Process Control* (2.ª ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Ogata, K. (2002). *Sistemas de control en tiempo discreto* (4.ª ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- Vaquero L., J. & González S., A. I. (2009). Un simulador como apoyo visual para el aprendizaje de las técnicas del control predictivo, *7<sup>th</sup> Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, pp. 1-10.

## Sobre los autores

---

### Norha Ligia Posada Restrepo

Ingeniera en Instrumentación y Control del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Especialista en Automática de la Universidad Pontificia Bolivariana. Magíster en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana. Docente de la Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Mecánica.  
Autor1@upb.edu.co.

### Jhon Alexander Ramírez Urrego

Ingeniero en Instrumentación y Control del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.

Tecnólogo en Bioelectrónica del Tecnológico Pascual Bravo, miembro activo del grupo de investigación ICARO del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, área de Instrumentación, Control Automático y Robótica.  
Autor2@elpoli.edu.co.

### Dayron Antonio Álvarez Rodríguez

Ingeniero en Instrumentación y Control del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.  
Autor3@hotmail.com.

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.