



Laboratorio virtual asistido con Matlab para un sistema multivariable industrial

Daniel Guzmán
 Secundino Marrero
 Ángel O. Columbié
 Cleto de Sousa

Recibido: Julio del 2007
 Aprobado: Septiembre del 2007

Resumen / Abstract

En el presente artículo los autores presentan y exponen los resultados obtenidos en la conformación de un laboratorio virtual asistido con Matlab, para el diseño de un controlador multivariable en una columna de destilación. Aquí se expone el estudio de un método de desacoplamiento el cual es basado en la matriz de funciones de transferencia del proceso. El aspecto novedoso de la metodología empleada radica en el uso de un modelo experimental de una columna de destilación para implementar a través de la simulación un control por desacoplamiento clásico, con una correspondiente evaluación de su desempeño. Los resultados finales son mostrados en respuestas temporales usando Matlab.

Palabras clave: Multivariable, columna de destilación, laboratorio virtual

In this paper the authors present and discuss results obtained on the conformation of a practice of virtual laboratory attended with Matlab, for the design of a multivariable controller for a distillation column. It's carried out a study of the decoupling method to be implemented, which is based on the use of the transfer functions matrix of the researched process. The innovative aspect of the employed methodology lies on the use of the experimental model of a real distillation column in order to implement, through simulation, techniques of classical decoupling with the correspondent performance evaluation. The final results are shown through the obtained time responses using Matlab.

Key words: Multivariable, distillation column, virtual laboratory

INTRODUCCIÓN

En la última década los recursos informáticos han tenido un amplio desarrollo, lo que ha permitido que la inversión en el control de los procesos que involucran gastos energéticos importantes aumente significativamente, permitiendo que técnicas de control más elaboradas puedan ser implementadas para ahorrar energía. Debido a la gran diversidad de procesos y a cuestiones de política industrial, esas mejorías aún no son hoy difundidas en todas las plantas, actualmente existen, por ejemplo, industrias químicas y termoeléctricas donde la automatización es deficiente.

De esta forma se comprende que el conocimiento del proceso, el desarrollo de modelos matemáticos dinámicos que representan los fenómenos físico-químicos de las plantas, la simulación en computadora de sus características y por fin, el proyecto e implementación de sistemas de control con técnicas avanzadas, es un tema de importancia fundamental para el desarrollo actual del sector industrial y disminuir el consumo de portadores energéticos importantes.¹

Dada esta importancia, se hace necesario la introducción y desarrollo en los niveles superiores de formación y posgraduación del ingeniero eléctrico, de control y químico, el estudio de nuevas técnicas de control avanzado, que respondan a este reto actual,

aprovechando las facilidades de recursos que disponen programas tales como el Matlab.

DESARROLLO

En la referencia 2 se trata la utilización de los controladores multivariables con desacoplamiento en la industria, lo que es analizado por otros autores,^{3,4} poniendo en evidencia la importancia de los mismos. Al desarrollarse en épocas recientes la implementación de sistemas multivariables (MIMO), aparecen técnicas de desacoplamiento de variables, que sin duda mejoran el desempeño de estos.

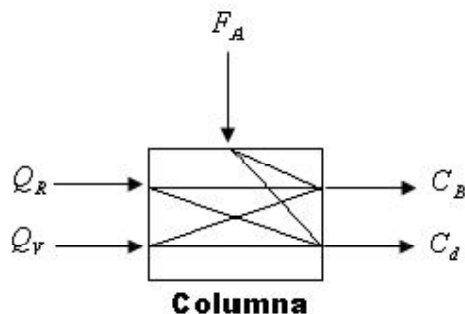
Como caso de estudio, para mostrar la metodología a seguir en la realización del laboratorio virtual asistido con Matlab y las simulaciones de este tipo de sistema, se selecciona, por su importancia energética y tecnológica, así como por su extendida existencia en la industria moderna, el modelo de una columna de destilación real, tomado de una experiencia,⁵ este tipo de sistema en su esencia es muy complejo, dada las interacciones de sus variables y la presencia entre las mismas del llamado "tiempo muerto", aspecto que lo hace a su vez atractivo para ser analizado a escala virtual, semejante a lo realizado.¹

Para la correcta implementación y prueba de este tipo de sistema multivariable, en un laboratorio virtual asistido con Matlab, es necesario que se cumplimenten las etapas de trabajo explicadas a continuación.

Análisis dinámico del modelo en lazo abierto

Para la correcta selección de la estrategia de control, en sistemas industriales multivariables, se propone inicialmente realizar un estudio dinámico de los objetos a regular,² para así poder evaluar sus características, a partir de sus principales parámetros, como objeto de regulación automática.

En este sistema, existen dos variables de entrada y dos de salida, más una de perturbación, tal y como se muestra en la figura 1. Las variables de entrada o manipuladas son el reflujo del destilado, el flujo de destilación.



Variables de un sistema multivariable industrial de destilación.

Las variables de salida o controladas son la composición de los sedimentos C_B y la composición del destilado C_d . La variable de perturbación es el flujo de alimentación del componente F_a .

Partiendo del modelo matemático del sistema multivariable industrial obtenido experimentalmente,⁵ así como del resultado del estudio dinámico realizado, se evalúa el comportamiento de cada una de las variables que intervienen en el proceso, proponiéndose una estrategia de control, que satisfaga los requerimientos del proceso real. Para realizar este estudio las entradas fueron excitadas con funciones paso escalón, entorno del valor nominal de operación.

Selección de los mejores pares de variables

Al proponer una estrategia de control para este sistema, es necesario primeramente seleccionar los pares de variables manipuladas y controladas, por tratarse de un sistema multivariable. Los problemas de control con múltiples entradas y salidas (MIMO) se encuentran hoy difundidos en los procesos industriales modernos, que son a su vez más complejos que los sistemas con una entrada y una salida (SISO), debido a la interacción que ocurre entre sus variables, la selección de los mejores pares de variables manipuladas y controladas para un esquema de control multilazo es una tarea no trivial.

Las técnicas existentes para esta selección, van desde el RGA de Bristol, hasta la descomposición en valores singulares (SVD),¹ a partir de la matriz de ganancias de la función de transferencia del proceso.

Al descomponer la matriz de régimen estacionario en sus valores singulares se pueden escoger los mejores pares de variables para el control, de ahí que se tenga:

$$U = \begin{bmatrix} -0,7454 & -0,6666 \\ -0,6666 & 0,7454 \end{bmatrix} \begin{matrix} C_d \\ C_B \end{matrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} -0,4585 & -0,8887 \\ 0,8887 & -0,4585 \end{bmatrix} \begin{matrix} Q_R \\ Q_V \end{matrix} \quad \dots(1)$$

Al tomar el mayor componente de cada uno de los vectores de la izquierda (U), con el mayor componente de cada uno de los vectores de la derecha (V), aparecen los pares de variables manipuladas y controladas para este sistema:

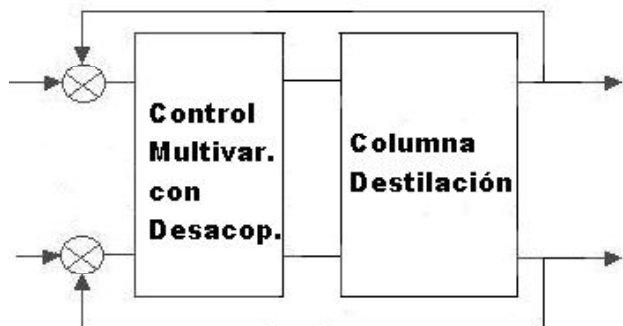
$$Q_V(0,8887) \Rightarrow C_d(-0,7454)$$

$$Q_R(-0,8887) \Rightarrow C_B(0,999)$$

Para la implementación y prueba de los controladores, a partir de la simulación del modelo matemático del

sistema, es preciso determinar el período de muestreo,⁶ el cual depende más de la práctica que de la teoría. Muchas sugerencias y reglas han sido descritas para su selección, en el caso de los controladores multivariables,^{4,7} Consideraciones prácticas indican que el tiempo de muestreo debe ser menor que el de la constante de tiempo dominante.^{3,4} Tomando la constante de tiempo de la repuesta más rápida, en este caso el de la composición del destilado C_d , el tiempo de muestreo escogido fue de 0,86 min.

En el caso del sistema industrial investigado, que representa un sistema de dos entradas y dos salidas, la estrategia seleccionada fue el controlador multivariable con desacoplamiento estático total, como se muestra en la figura 2, con método de sintonía secuencial que para sistemas multivariables fue desarrollada⁸ lineales, analizándose dos variantes, cuando el sistema está descompensando y cuando ya es compensado.



Controlador multivariable de un sistema industrial de destilación.

2

Diseño del controlador multivariable con desacoplamiento estático total

Para problemas de control moderno con grandes interacciones entre las variables controladas y manipuladas, las configuraciones de un control PID multilazo convencional pueden no estar aptas a proveer el control más adecuado. En estos casos, otras estrategias de control avanzado, tales como la estrategia de control multivariable por desacoplamiento, ofrecen potencial para mejorar su desempeño.

En el control por desacoplamiento, el objetivo principal es reducir las interacciones adicionando un controlador denominado desacoplador a la configuración convencional multilazo. Esto es realizado por la introducción de una función de transferencia adicional o compensador de interacciones, junto con el controlador de lazo simple, constituyendo entonces el controlador multivariable desacoplado como se muestra en la figura 2.

Para el diseño y sintonía del controlador multivariable desacoplado se pueden usar las técnicas dadas en

las referencias 7 y 9, donde ambos coinciden en afirmar que esta técnica puede ser aplicada a procesos con muchas entradas y muchas salidas, como son los energéticos. Genéricamente un sistema $n \times n$, conduce a $n^2 - n$ compensadores.

En el presente trabajo se propone aplicar el diseño basado en la metodología explicada en la referencia 1, a través del arreglo inverso de Nyquist (INA). Estos conceptos y teoremas se encuentran también en los trabajos de autores ya mencionados.¹⁰ Otro teorema que describe de una forma más completa la dominancia diagonal es el empleado para generar la base del criterio de estabilidad de Nyquist en los diseños de sistemas MIMO.¹¹

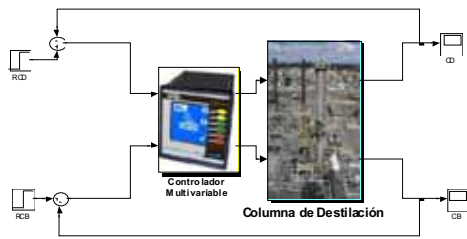
El método para reducir las interacciones entre los lazos de control a partir del INA, se fundamenta en determinar una matriz inversa de precompensación $\hat{K}_{PR}(s)$ y posiblemente una de poscompensación $\hat{L}_{PO}(s)$ tal que: $\hat{Q}(s) = \hat{K}_{PR}(s) \hat{G}_p(s) \hat{L}_{PO}(s)$, donde la matriz inversa $\hat{Q}(s)$ tiene que ser diagonalmente dominante. Cuando la dominancia es alcanzada, entonces los controladores pueden ser proyectados como en el caso SISO. La metodología para el diseño del INA basado en la teoría de la dominancia diagonal.^{1, 10, 11}

La ventaja de este tipo de desacoplamiento reside en su facilidad para ser determinado e implementado, realizando los cálculos y gráficos asistidos con Matlab. Los parámetros de sintonía para este tipo de controlador van a ser los mismos empleados en la sintonía de un controlador PID multilazo, con el objetivo de poder evaluar la acción de los desacopladores empleados.

En el caso de la columna de destilación empleada, el sistema necesita un desacoplamiento, el esquema de simulación de la misma se muestra en la figura 3.

La figura 4 muestra el diagrama de Nyquist para cada una de las funciones de transferencias inversas, antes de alcanzar la dominancia diagonal (sistema descompensado), se observa que solo la función g_{11} no es diagonalmente dominante, debido a que las bandas de Gershoring incluyen en su recorrido el punto de origen. El valor de la ganancia (f) al tocar las bandas el eje real negativo para el diagrama de g_{11} es -0,3 y para g_{22} es 0,05.

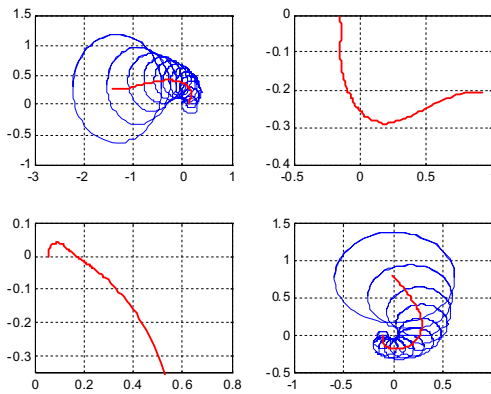
Cuando es proyectado el precompensador, aplicando la metodología del INA, se obtiene $\hat{Q}(s)$ y se puede observar que las funciones alcanzan la dominancia diagonal (sistema compensado), en figura 5, debido a que las bandas no incluyen en su recorrido el origen. Para el sistema en lazo cerrado serían las ganancias anteriormente señaladas f_i .



(Columna Wood and Berry)
Laboratorio Virtual
Sistemas Multivariables
CNPq-FAPEAM
ISMM, EST-JEA

Esquema de un laboratorio virtual de simulación de un sistema multivariable industrial de destilación.

3



Diagramas de Nyquist para cada una de las funciones de transferencia inversa antes de alcanzar la dominancia diagonal (sistema descompensado).

4

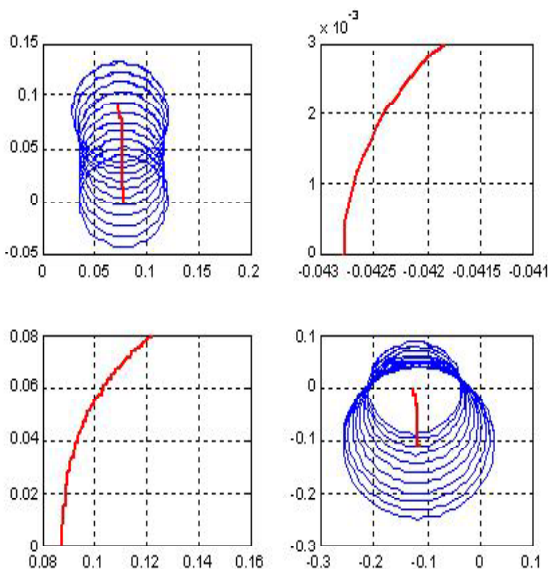


Diagrama de Nyquist para cada una de las funciones de transferencia inversa al alcanzar la dominancia diagonal (sistema compensado).

5

RESULTADO DE LAS SIMULACIONES EN EL LABORATORIO VIRTUAL

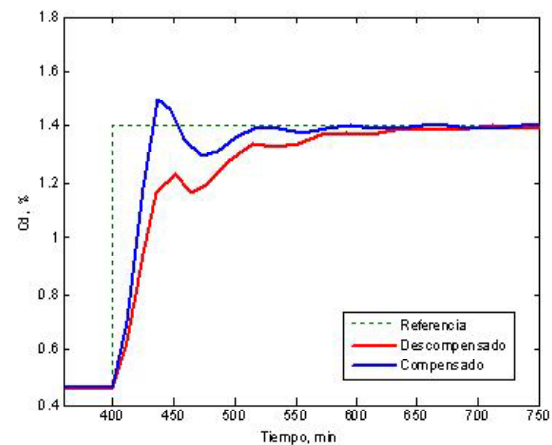
Para evaluar el desempeño del controlador multivariable proyectado son realizadas variaciones en la referencia y la carga, tipo paso escalón, las desviaciones tomadas se encuentran en el rango permitido por el proceso real.

Los resultados de las simulaciones a lazo cerrado, a través de los métodos de sintonía propuestos, dan una medida del comportamiento del controlador multivariable descompensado y con compensación o desacoplamiento. Los mismos son mostrados en las figuras 6, 7, 8 y 9 y 10 para las variaciones en el valor de referencia y las figuras 11 y 12 para las variaciones en la carga.

Este estudio permite apreciar que al mejorar el desempeño en las respuestas de las variables analizadas se logra menos gasto energético con el sistema compensado minimizando las pérdidas de vapor de agua empleado.

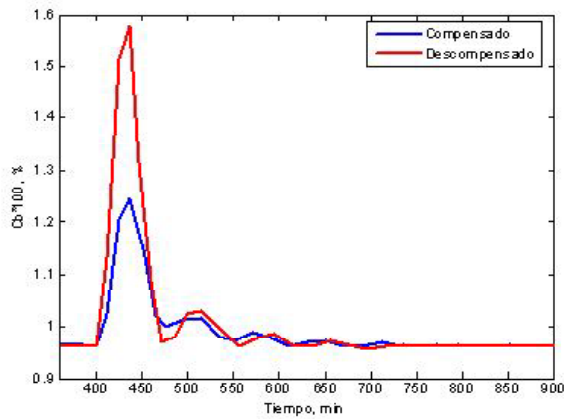
Se pueden emplear entonces los mismos métodos de sintonía usados para los controladores PID multilazo,² o alguna otra forma de sintonía conocida,^{8,12} los resultados se muestran en la tabla 1.

Lazo de control	k_c	i	Tipo de acción de control
Q_v C_d	0,021	8,1	Directa
Q_R C_B	0,015	7,6	Directa



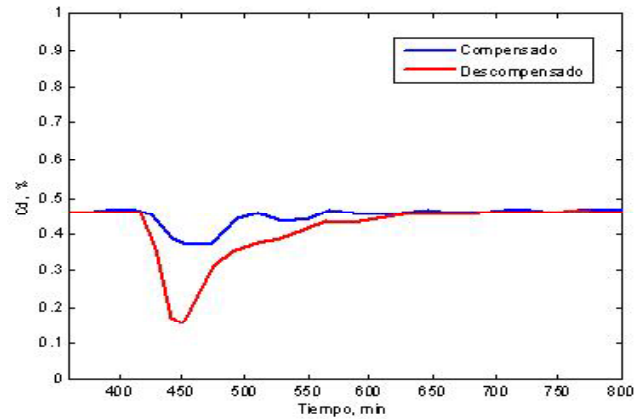
Respuesta de la composición del destilado a las variaciones en su referencia, cuando el sistema está compensado y descompensado.

6



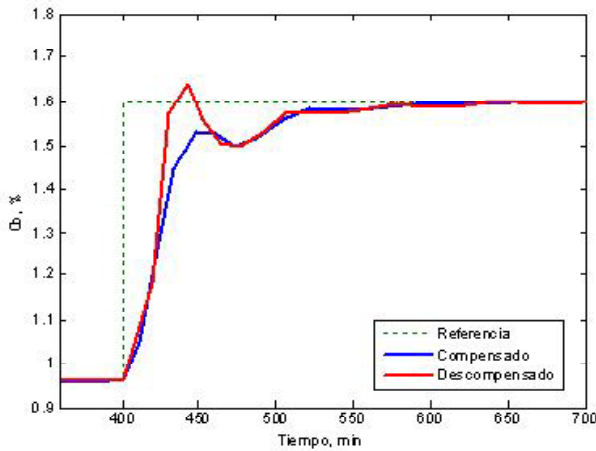
Influencia de las variaciones en la referencia de la composición del destilado sobre la composición del sedimento, cuando el sistema está compensado y descompensado.

7



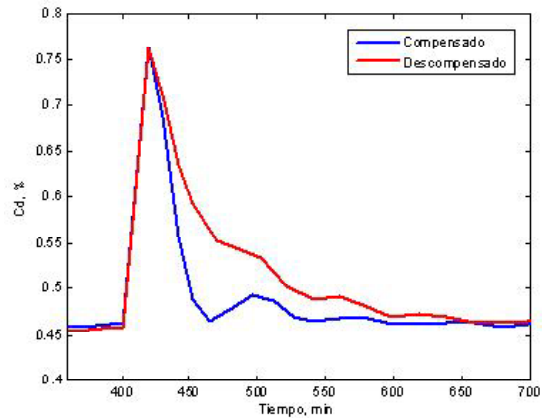
Influencia de las variaciones en carga de componentes de alimentación F_A del lazo de composición de sedimentos, sobre la composición del destilado, cuando el sistema está compensado y descompensado.

10



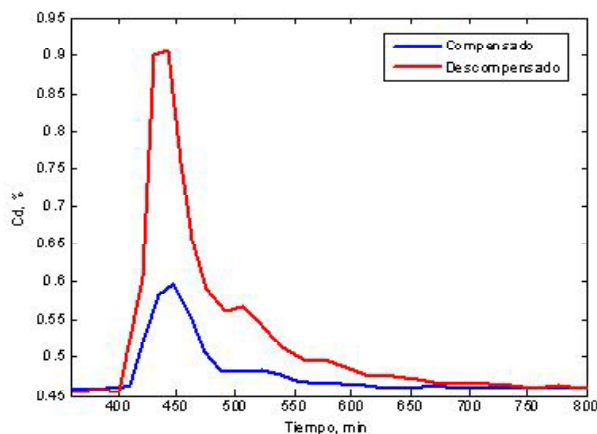
Respuesta de la composición del sedimento a las variaciones en su referencia, cuando el sistema está compensado y descompensado.

8



Influencia de las variaciones en carga de componentes de alimentación F_A del lazo del destilado, sobre la composición del destilado, cuando el sistema está compensado y descompensado.

11



Influencia de las variaciones en la referencia de la composición del sedimento sobre la composición del destilado, cuando el sistema está compensado y descompensado.

9



Influencia de las variaciones de carga de componentes de alimentación F_A del lazo de destilado, sobre la composición del sedimento, cuando el sistema está compensado y descompensado.

12

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se demuestra que aprovechando las facilidades de recursos que disponen programas tales como el Matlab, es posible el desarrollo, en los niveles superiores de formación y posgraduación, el estudio de nuevas técnicas de control avanzado, que respondan a los retos actuales de control para ahorrar energía e insumos y elevar la calidad del producto final en la industria.

El conocimiento del proceso, el desarrollo de modelos matemáticos que representan los fenómenos de las plantas, a partir de balances de masa y energía, sintetizados luego en sus funciones de transferencia y la simulación en computadora de sus características, y por fin el proyecto e implementación de sistemas de control con técnicas avanzadas, es un tema de importancia fundamental para el desarrollo actual del sector industrial y puede ser utilizado en la docencia, al mismo tiempo como laboratorios virtuales, tal y como está expresado ya en los programas C perfeccionado y el nuevo D de estudio. Los resultados obtenidos del diseño y la sintonía del controlador multivariable aplicado a un sistema real asistido con Matlab, muestran que la metodología seguida puede ser aplicada a cualquier otro modelo tomado como caso de estudio de cualquier tipo de sistema incluyendo los electroenergéticos.

El sistema con compensación de interacciones demostró mejor desempeño en sus respuestas que el sistema descompensado, gracias a las simulaciones realizadas, aspectos que son imposibles de apreciar muchas veces en un sistema real *on-line*.

AGRADECIMIENTOS

A la dirección del ISMM, Departamento de Control de la Cujae y la EST-UEA, FAPEAM y CNPq, por el soporte técnico y financiero de las actividades realizadas, a los estudiantes y profesores que apoyaron este trabajo.

REFERENCIAS

- 1. Deshpande, P. B.:** "Multivariable Process Control", *Instrument Society of America*, North Carolina, 1989.
- 2. Guzmán, D. R.:** "Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato-amoniaco", Tesis de doctorado, Cujae, Ciudad de La Habana, 2001.
- 3. Clarke, D. W. and P. J. Gawthrop:** "Implementation and Applications of Microprocessor-Based Self-Tuners", *Automatica*, Vol.17, No.1, pp.233-244, 1981.
- 4. Seborg, D. E.; T. F. Edgar and D. A. Mellichamp:** *Process Dynamics and Control*, John Wiley & Sons. New York, 1989.
- 5. Wood, R. K. and M. W. Berry:** "Terminal Composition Control of a Binary Distillation Column", *Chemical Engineering Science*, No. 28, pp. 1707, 1973,

6. Zanabria, O. A: *Modelamento, Simulação e Controle de um Processo de Neutralização de pH*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Eletrônica, Dissertação de Mestrado, São Paulo, 1997.

7. Smith, C. A. and A. B. Corripio: *Principles and Practice of Automatic Process Control*, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1997.

8. Shing-Jia, S. and H. Shyh-Hong: "Sequential Design Method for Multivariable Decoupling and Multiloop PID Controllers", *Ind. Eng. Chem. Res.*, No.37, pp. 107-119, 1998.

9. Harold, L.: "Inverted Decoupling: A Neglected Technique", *Wades Associates, Inc. ACOS Newsletter*, ISA, 1997.

10. Chen, C. L. and N. Munro: "Procedure to Achieve Diagonal Dominance Using a PI/PID Controller Structure", *International Journal of Control*, Vol.50, No.5, pp. 1771-1792, 1989.

11. Rosenbrock, H. H.: *State Space and Multivariable Theory*, John Wiley & Sons, New York, 1970.

12. Weng, K. H.; H. L. Tong and P. G. Oon: "Tuning of Multiloop Proportional-Integral-Derivative Controllers on Gain and Phase Margin Specifications", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, No.36, pp. 2231-2238, 1997.

AUTORES

Daniel Guzmán del Río

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Escuela Superior de Tecnología, Universidad del Estado de Amazonas (UEA), Brasil
e-mail:dguzman210@yahoo.es
dguzman@ismm.edu.cu
drio@uea.edu.br

Secundino Marrero Ramírez

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Eléctrica, ISMM, Moa, Holguín, Cuba
e-mail:smarrero@ismm.edu.cu

Ángel O. Columbié Marrero

Ingeniero Metalúrgico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Eléctrica, ISMM, Moa, Holguín, Cuba
e-mail:acolumbie@ismm.edu.cu

Cleto de Souza Cavalcante Leal

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Profesor Asistente, EST-UEA, Brasil
e-mail:cleal@uea.edu.edu.br