

EDITORIAL

El avance científico-técnico de un país se mide por la capacidad de generar y aplicar el conocimiento humano a la solución de sus problemas, y el saber compartir conocimientos y experiencias en la búsqueda de soluciones comunes a problemas comunes de países con condiciones sociales y culturales parecidas.

Los rápidos cambios en la estructura política de los países de la Europa Oriental, influirá en los procesos políticos y económicos de los nuestros, disminuyendo sustancialmente los recursos de inversión en la región, debido a la apertura de mercados que objetivamente presentan mayores ventajas, dando un duro golpe a los tradicionales procesos de desarrollo.

Nuestros gobiernos deberán replantear sus modelos y considerar prioritaria la inversión de mas alta rentabilidad como el camino mas idoneo para enfrentar la crisis, esto es la **Educación** y la **Investigación**.

Por otro lado, la adquisición de tecnología debe obligatoriamente hacerse en un marco de profunda crítica y sentido social, tendiendo fundamentalmente al desarrollo de una industria menos dependiente, que integre una serie de procesos que nuestra técnica está en plena capacidad de realizarios.

Las **JORNADAS EN INGENIERIA ELECTRICAY ELECTRONICA** se enmarcan en éste contexto, pretendiendo una vez mas ser el mecanismo para difundir, discutir y formular inquietudes que conduzcan a delinear estrategias, que basadas en un amplio conocimiento de la ciencia nos lleven hacia el uso racional de tan prodigioso don de la naturaleza, "**La Electricidad**".

Con ocasión de realizarse la Décima Primera edición del evento, quiero expresar el reconocimiento de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, de la Escuela Politécnica Nacional a la tarea investigativa de tan selecto grupo de trabajadores de la Ciencia y la Técnica.

Ing. Carlos Riofrío Reyes
DECANO

ELECTRONICA Y CONTROL

PABLO ALVARADO P., ING.
 UNIVERSIDAD DE CUENCA
 LUIS BARAJAS, ING.
 ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

RESUMEN

Se ha desarrollado un programa para la simulación de sistemas de control en un computador digital. El programa, implementado para un computador IBM o compatible, permite la simulación de gran cantidad de sistemas por cuanto la entrada de datos se generaliza gracias a que se fundamenta en un diagrama de simulación analógica, y el tratamiento del modelo matemático del sistema se realiza en base a su descomposición en un conjunto de "módulos o bloques" matemáticos. El programa dispone o simula un total de 25 módulos entre los que se cuentan funciones lineales, no lineales y lógicas. La integración numérica de las ecuaciones diferenciales se realiza con el algoritmo de Runge-Kutta de cuarto orden. Para presentar los resultados se utiliza la hoja electrónica LOTUS 123.

INTRODUCCION

Las diferentes técnicas de análisis y diseño de sistemas, sean estas convencionales o modernas, persiguen como objetivo fundamental el obtener la mayor información posible sobre el funcionamiento dinámico de los mismos. Si bien es verdad, las técnicas convencionales permiten obtener buenos resultados en el análisis de sistemas lineales de una sola variable, no es menos cierto que estos métodos se vuelven completamente inefectivos para el análisis de sistemas que involucran muchas entradas, muchas salidas y/o alinealidades.

Actualmente, gracias al desarrollo de poderosos computadores analógicos y digitales, las técnicas de simulación para el diseño de sistemas permiten afrontar problemas de gran complejidad y necesidades rigurosas en cuanto a exactitud.

Sin duda, la simulación analógica se convierte en una de las herramientas más versátiles para el diseño de sistemas, gra-

cias a la infinidad de posibilidades de simulación de las que se dispone en los modernos computadores análogos híbridos. Sin embargo, muy pocos centros de estudio y peor aún profesionales pueden disponer de dichos equipos. Por esta razón, se presenta una alternativa de simulación similar a como lo hace un computador analógico pero trabajando con un computador digital. Así, los datos del sistema por analizar se introducen al computador teniendo como base un diagrama de simulación analógica, obteniéndose como resultados valores numéricos o gráficos de cualesquiera de los puntos de interés.

EL PROGRAMA

Tratándose de "convertir" al computador digital en uno analógico, las características relevantes del programa de simulación son:

- El programa es capaz de interpretar cualquier diagrama de simulación sin alterar la estructura de la entrada de datos.
- Cuando se realiza el diseño de sistemas es necesario investigar el comportamiento dinámico frente a la variación de uno o más parámetros. En un computador análogo este trabajo es sencillo de realizar ya que basta cambiar los valores de los potenciómetros que representan los parámetros de interés y observar el comportamiento de la simulación. El programa digital permite también esta opción, es decir, es factible cambiar los valores de las constantes y las funciones de entrada del sistema sin necesidad de introducir nuevamente la totalidad de los datos.
- El computador digital puede ser programado para generar cualquier función de entrada.
- Se puede obtener resultados numéricos o gráficos de cualesquiera de los puntos del

diagrama de simulación. En realidad, en este sentido se superan ampliamente las características de un computador análogo.

- El programa está dotado de la capacidad de análisis del diagrama y de detección de fallas de ejecución, por tanto, malas conexiones en el diagrama o errores de cálculo detienen el proceso dando la indicación respectiva sobre el error.

Los errores de cálculo resultantes son relativamente bajos, en todo caso menores a los errores que se obtienen en el computador análogo.

ENTRADA DE DATOS

El menú principal del programa dispone de 4 opciones. La opción 1 (Problema nuevo), permite resolver un problema de simulación de principio a fin. La opción 2 (Problema con datos cambiados), resuelve un problema cuyos datos han sido cambiados luego de una primera evaluación. La opción 3 (Revisar un archivo de datos), se escoge para revisar los datos y resultados de un problema analizado. Por último, la opción 4 (Terminar), permite salir del programa y retornar el control al sistema operativo.

Al escoger la opción 1, los datos del problema entran al computador con la ayuda de menús, consultas en la pantalla y con la base de un diagrama de simulación analógica. El diagrama tiene las siguientes características.

- Ningún módulo invierte la señal.

- Las constantes pueden tener cualquier valor real dentro del rango permisible para variables reales en el computador.

- Los módulos disponibles son

MODULOS LINEALES	N. ENTRADAS
Sumador	2 o más
Integrador	1
Retardo en el tiempo	1

MODULOS NO LINEALES	N. ENTRADAS
Limitador	1
Comparador	1
Comparador con histéresis	1
Rectificador de media onda	1
Valor absoluto	1
Zona muerta	1
Alinealidad de juego	1

MODULOS NO LINEALES	N. ENTRADAS
Cuadrador	1
Raíz cuadrada	1
Logaritmo natural	1
Exponencial	1
Seno	1
Coseno	1

MODULOS LOGICOS	N. ENTRADAS
Compuerta AND	2 o más
Compuerta NAND	2 o más
Compuerta OR	2 o más
Compuerta NOR	2 o más
Biestable SR	2
Monoestable	1

OTROS MODULOS	N. ENTRADAS
Multiplicador	2 o más
Divisor	2
Switch análogo	2

- No se puede exceder el número máximo de entradas permitido para cada módulo.

- Todas las entradas son afectadas por un potenciómetro antes de llegar al módulo.

- Las entradas externas del sistema pueden ser aplicadas solamente a módulos que aceptan más de una entrada.

- Se consideran como salidas del sistema a cada una de las salidas de los módulos. Para diferenciarlas se debe enumerar los diferentes puntos.

- Las entradas del sistema son llamadas u_i donde i es el subíndice que las diferencia.

- Los valores lógicos asumidos son: entre 0 y 0.2 para 0; y 0.8 y 1.0 para 1.

Con el diagrama de simulación, la definición de su topología y de los diferentes módulos con sus parámetros es sencilla.

Las entradas externas son definidas como líneas de programación BASIC lo que da gran versatilidad e infinidad de posibilidades de generación.

El diagrama de flujo de la Fig. 1 muestra la secuencia de operación del programa de entrada de datos.

PROGRAMA DE EVALUACION

El programa de evaluación está desarrollado en GW-BASIC (1) y compilado. La integración numérica se basa en el algoritmo de

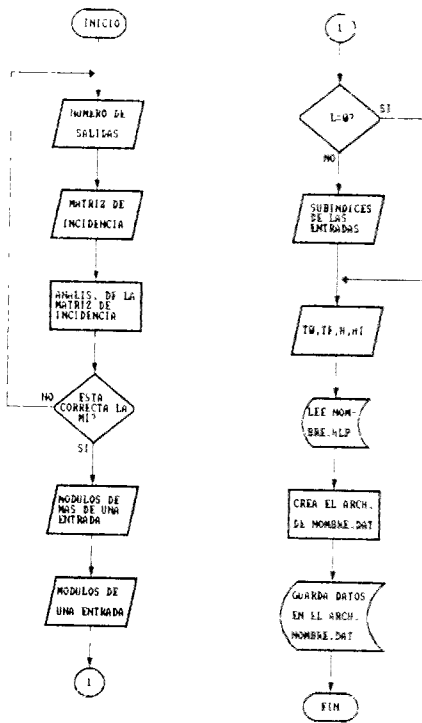


FIG. 1. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA INT.EXE

Runge-Kutta de cuarto orden (2).

El proceso se cumple sin encontrar las ecuaciones que describen al sistema sino más bien en base a un seguimiento del diagrama de simulación adecuadamente codificado durante la entrada de datos.

Veamos como aplicar el algoritmo de Runge-Kutta para evaluar el diagrama de simulación. Si a cada salida de un integrador le asignamos una variable de estado $x_i(t)$, y llamamos X al vector columna de dimensiones $n \times 1$ que contiene a las variables de estado (vector de estado), podemos escribir la ecuación

$$dX/dt = f(t, X) \quad (1)$$

donde f representa el conjunto de funciones que determinan los valores de las entradas de los integradores en función de sus salidas y de las entradas externas del sistema. Notemos que f viene dada en forma implícita dentro del diagrama de simulación, es decir, las relaciones para las entradas de los integradores se encuentran establecidas en forma gráfica.

JIEE, Vol. 11, 1990

Llamemos $X_n = X(t_n)$ al vector de estado evaluado en $t = t_n$. El algoritmo de Runge-Kutta permite evaluar el vector de estado en $t = t_{n+1} = t_n + h$ con las siguientes relaciones

$$\begin{aligned} X_{n+1} &= X_n + (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \\ K_1 &= hf(t_n, X_n) \\ K_2 &= hf(t_n + h/2, X_n + K_1/2) \\ K_3 &= hf(t_n + h/2, X_n + K_2/2) \\ K_4 &= hf(t_n + h, X_n + K_3) \end{aligned} \quad (2)$$

notemos que para determinar K_1 basta evaluar los valores de las entradas de los integradores a partir de los valores de sus salidas y las entradas externas y multiplicar el resultado por h . De igual forma, para evaluar K_2 se debe calcular el valor de las entradas externas en $t = t_n + h/2$, evaluar el valor de las entradas de los integradores asignando al vector de estado el valor de $X_n + K_1/2$ y multiplicar el resultado por h . Procedimientos similares permiten calcular K_3 y K_4 . En resumen, el procedimiento para calcular el valor de las salidas del diagrama en un tiempo t_{n+1} a partir de sus valores conocidos en t_n es:

- Leemos el valor de las entradas externas del sistema en t_n .
- Calculamos el valor de todas las salidas del diagrama en t_n .
- Buscamos que salidas del diagrama corresponden a las entradas de los integradores y asignamos estos valores, multiplicados por h , al vector K_1 .
- Leemos el valor de las entradas externas del sistema en $t_n + h/2$.
- Asignamos a las salidas de los integradores (vector de estado), el valor de $X_n + K_1/2$.
- Para estos nuevos valores, calculamos el valor de todas las salidas del diagrama.
- Asignamos al vector K_2 los valores de las entradas de los integradores multiplicados por h .
- Asignamos a las salidas de los integradores en valor de $X_n + K_2/2$.

- Calculamos el valor de todas las salidas del diagrama.
- Asignamos al vector K_3 los valores de las entradas de los integradores multiplicados por h .
- Leemos los valores de las entradas externas en t_k+h .
- Asignamos a las salidas de los integradores el valor de X_k+K_3 .
- Calculamos el valor de todas las salidas del diagrama.
- Asignamos al vector K_4 los valores de las entradas de los integradores multiplicadas por h .
- Calculamos el valor de las salidas de los integradores en t_{k+1} con la ecuación

$$X_{k+1} = X_k + (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) / 6$$

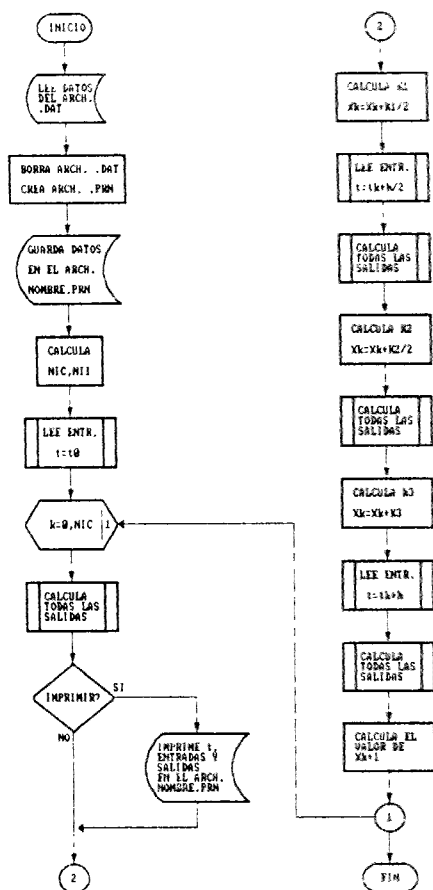


FIG. 2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA SOL.EXE

Un programa principal se encarga de determinar el valor de las salidas de los integradores en un tiempo t_{k+1} a partir de sus valores conocidos y de los valores de las entradas externas en t_k , de acuerdo con el algoritmo descrito. El diagrama de flujo de la Fig. 2 muestra la estructura de este programa.

Una subrutina se encarga de evaluar el valor de las salidas de todos los puntos del diagrama a partir de los valores de las salidas de los integradores. En la Fig. 3 se muestra la estructura de la subrutina.

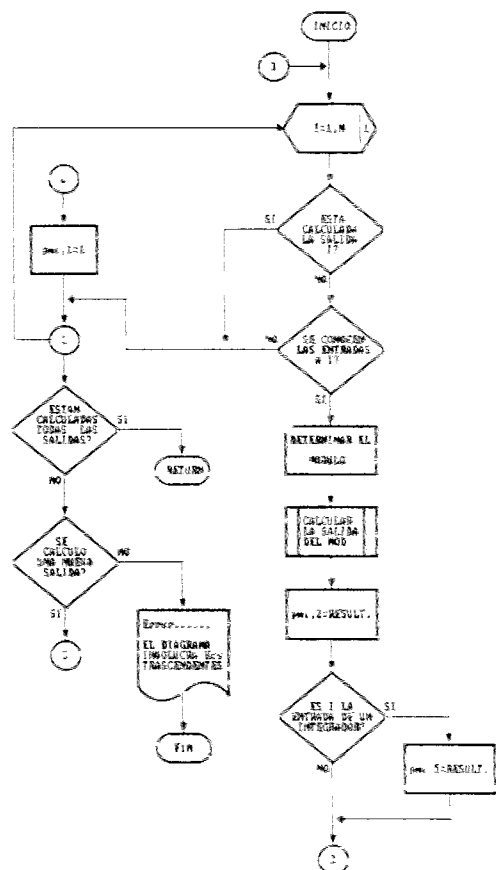


FIG. 3. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SUBROUTINA DE CALCULO DE TODAS LAS SALIDAS

PRESENTACION DE RESULTADOS

Para la presentación de los resultados se escoge la hoja electrónica lotus 123 (3) con el fin de darle mayor versatilidad al proceso. En esta hoja, los resultados son analizados con la ayuda de macro instrucciones y menús. Las opciones disponibles son:

CHDIR. Para cambiar el directorio corriente

REVISAR. Para cargar un archivo de datos y resultados.

IMPRIMIR. Para imprimir un rango determinado de la hoja.

GRAFICAR. Para crear gráficos en la pantalla

PGRAFIC. Almacena un gráfico para su futura impresión.

ALMACENAR. Guarda la hoja de trabajo como un archivo de Lotus.

OTROS. Da el acceso a un submenú de resultados.

OTROS/ CAMBIAR. Permite cambiar los datos de las constantes involucradas en el problema. Los datos cambiados pueden ser evaluados con la opción 2. del menú principal.

OTROS/ ALMACENAR. Almacena los datos cambiados en el disco de datos.

OTROS/ MENU. Retorna al menú inicial.

OTROS/ SALIR. Para salir del menú de resultados al menú de Lotus.

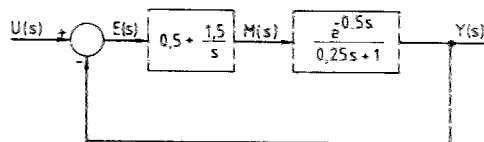
OTROS/ FIN. Para salir de la hoja a imprimir gráficos o al menú principal.

Como se puede ver, las diferentes opciones del menú de resultados cubren gran cantidad de operaciones requeridas para un correcto análisis de los resultados. Operaciones adicionales pueden ser realizadas utilizando los menús propios de Lotus.

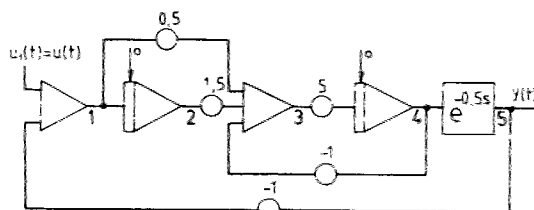
EJEMPLOS

Se consideran algunos ejemplos para demostrar la capacidad del programa de simulación.

1. El sistema de la Fig. 4(a) presenta el diagrama de bloques de la red principal de una planta de energía nuclear (4). El diagrama de simulación para observar el comportamiento del sistema frente a una perturbación escalón unitario en la entrada de control se muestra en la Fig. 4(b).



(a)

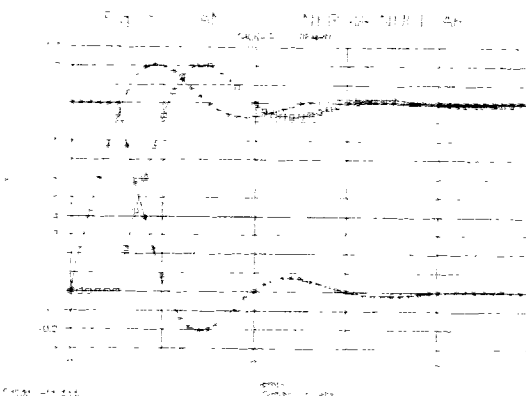


(b)

Fig. 4 (a) Diagrama de bloques de una planta de energía nuclear.

(b) Diagrama de simulación para el computador digital.

Corriendo el programa para $t_0=0$, $t_f=6$ y un intervalo de integración de 0.1 se obtienen los resultados gráficos que se muestran en la Fig. 5.



2. El sistema de la Fig. 6(a) muestra el diagrama de bloques de un sistema de segundo orden con ganancia no lineal. Esta configuración se utiliza para sistemas sujetos a ruidos de baja amplitud y alta frecuencia (5). La función no lineal G_{NL} no está disponible como un solo módulo en el programa, sin embargo la podemos generar con la ayuda de otros módulos tal como se muestra en la Fig. 7.

Los resultados gráficos obtenidos se muestran en las Figs. 8 y 9.

Estos sencillos ejemplos muestran el poder del programa de simulación. Muchos otros ejemplos corridos por los autores permiten afirmar que los resultados obtenidos son verdaderamente favorables.

CONCLUSIONES

En general, el programa implementado permite simular la gran mayoría de las bondades de un computador análogo de gran capacidad, sofisticado equipo de medida y alta precisión. La principal desventaja frente a este último es el mayor tiempo requerido para la ejecución.

El diagrama de simulación puede tener cualquier configuración serie paralelo entre los módulos disponibles.

Los módulos disponibles cubren gran cantidad de funciones lineales, no lineales y lógicas necesarias para la simulación de sistemas, sin embargo, otras alinealidades pueden ser generadas mediante arreglos circuitales entre estos.

Al realizar la presentación de los resultados en la hoja electrónica LOTUS 123, se deja una infinidad de posibilidades para el análisis de los mismos, superando en este sentido ampliamente las características de un computador análogo.

El sistema empleado permite ilimitadas posibilidades para la generación de entradas externas.

El error de paso es despreciable si es que se utiliza un paso de integración suficientemente pequeño. Si el intervalo resulta muy corto, debido a sistemas con constantes de tiempo demasiado pequeñas, se puede recurrir a escalamientos en magnitud y tiempo para ampliarlo y conseguir menores tiempos de ejecución.

El lenguaje GW-BASIC COMPILADO, utilizado para implementar el programa da magníficos resultados tanto en la presentación como en la velocidad de ejecución.

En resumen el programa SIMULACION DIGITAL DE SISTEMAS DE CONTROL se convierte en una poderosa herramienta para la solución de ecuaciones diferenciales, en la cual, la entrada de datos se generaliza gracias a que se fundamenta en un diagrama de simulación. Adicionalmente, representa una alternativa para la integración numérica de ecuaciones diferenciales considerándolas

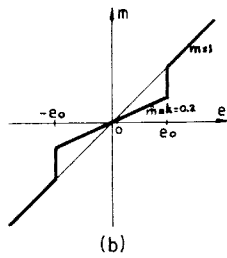
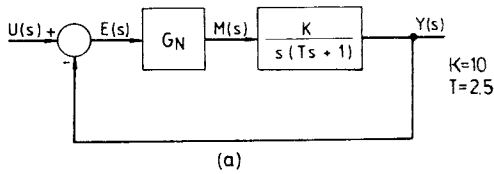


Fig. 6 (a) Diagrama de bloques de un sistema de segundo orden con ganancia no lineal.

(b) Función de transferencia del elemento de ganancia

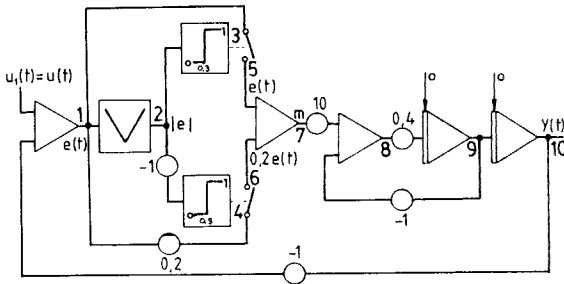


Fig. 7. Diagrama de simulación del sistema de la Fig. 6.

Fig. 8. SISTEMA DE GANANCIA NO LINEAL

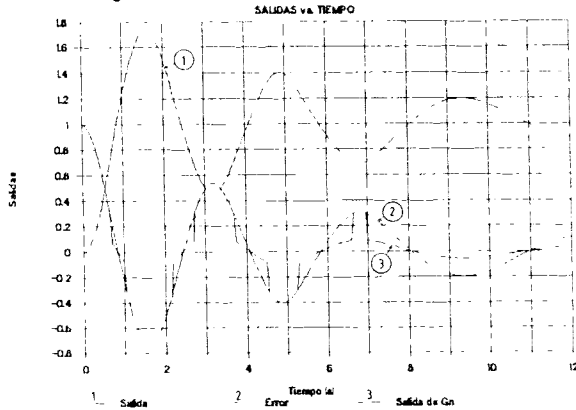
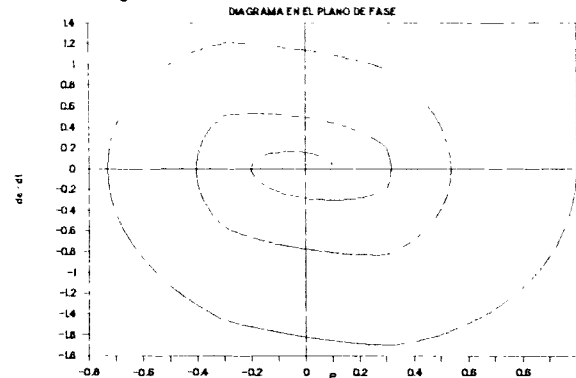


Fig. 9. SISTEMA DE GANANCIA NO LINEAL



como un conjunto de "bloques matemáticos" debidamente interconectados.

REFERENCIAS

1. NCR PERSONAL COMPUTER, *GM™-Basic*. NCR Corporation, 1984.
2. S. D. CONTE, CARL de BOOR, *Análisis Numérico Elemental*. McGraw-Hill, 1972; pp. 357-361.
3. LOTUS DEVELOPMENT CORPORATION, 1-2-3. Lotus Development Corporation, 1985.
4. RICHARD C. DORF, *Sistemas Automáticos de Control*. Fondo Educativo Interamericano S. A., 1978, pp. 371.
5. KATSUHIKO OGATA, *Ingeniería de Control Moderna*. Prentice-Hall International, 1974; pp. 644-652.

BIOGRAFIAS

LUIS BARAJAS, nació en Quito, Ecuador, Agosto de 1947. Obtuvo su título de Ingeniero Electrónico, 1973, en la Escuela Politécnica Nacional. Es Master en Ciencias especialización de Ingeniería de Sistemas, COPPE/Universidad Federal de Río de Janeiro-Brasil, Diciembre de 1975. Actualmente es Profesor Principal de la Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Areas Sistemas de Control e Instrumentación.



PABLO ALVARADO, nació en Cañar, Ecuador, Enero de 1962. Egresó de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, Escuela Politécnica Nacional, en la Especialidad de Electrónica y Control, Marzo de 1986.

Actualmente es profesor de la Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica, en las Areas de Electrónica Básica, Electrónica de Potencia y Laboratorio de Control Moderno. Se desempeña como Jefe del Departamenteo de Electrónica de la Compañía CATEM.