

# Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica  
ENERO/DICIEMBRE 2000 - VOLUMEN 10 - Nº 1 y 2





# COMPUTACIÓN DIGITAL COMO HERRAMIENTA EN LA DOCENCIA Y LA INVESTIGACIÓN

Diego W. Ospina

RESUMEN

Este artículo describe el uso de computadores digitales en la enseñanza y la investigación en psicología. Se discute el uso de computadores en la enseñanza de la psicología y en la investigación en psicología.

SUMMARY

This article describes the use of digital computers in teaching and research in psychology. The use of computers in the teaching of psychology and in research in psychology is discussed.

## INTRODUCCIÓN

El uso de computadores digitales en la enseñanza y la investigación en psicología ha crecido considerablemente en los últimos años. Este artículo describe el uso de computadores digitales en la enseñanza y la investigación en psicología. Se discute el uso de computadores en la enseñanza de la psicología y en la investigación en psicología.

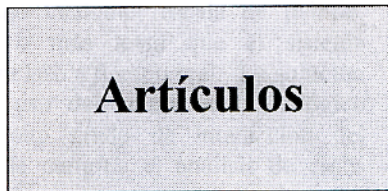
Desde el punto de vista de la enseñanza, el uso de computadores digitales en la enseñanza de la psicología ha crecido considerablemente en los últimos años. Este artículo describe el uso de computadores digitales en la enseñanza y la investigación en psicología. Se discute el uso de computadores en la enseñanza de la psicología y en la investigación en psicología.

## USO DE COMPUTADORES EN LA ENSEÑANZA DE LA PSICOLOGÍA

El uso de computadores digitales en la enseñanza de la psicología ha crecido considerablemente en los últimos años. Este artículo describe el uso de computadores digitales en la enseñanza y la investigación en psicología. Se discute el uso de computadores en la enseñanza de la psicología y en la investigación en psicología.

El uso de computadores digitales en la investigación en psicología ha crecido considerablemente en los últimos años. Este artículo describe el uso de computadores digitales en la enseñanza y la investigación en psicología. Se discute el uso de computadores en la enseñanza de la psicología y en la investigación en psicología.

El uso de computadores digitales en la enseñanza y la investigación en psicología ha crecido considerablemente en los últimos años. Este artículo describe el uso de computadores digitales en la enseñanza y la investigación en psicología. Se discute el uso de computadores en la enseñanza de la psicología y en la investigación en psicología.



**Artículos**

# LA SIMULACIÓN DIGITAL COMO HERRAMIENTA EN LA DOCENCIA Y LA INVESTIGACIÓN

Victor M. Alfaro

## Resumen

Este artículo describe la utilidad que tienen los programas de simulación digital en el estudio de los sistemas dinámicos en general y en particular, los de control automático. Mediante el uso de ejemplos se muestra la utilización del programa de simulación *VisSim*.

## Summary

The usefulness of digital simulation programs on dynamic and automatic control systems study is described. The use of the *VisSim* simulation program is presented using examples.

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento de los sistemas dinámicos es parte importante de la enseñanza e investigación en todas las ramas de la ingeniería, como en las ciencias en general. El desarrollo de un modelo matemático para sistemas dinámicos complejos con lleva usualmente al planteamiento de ecuaciones integrodiferenciales, o de conjuntos de ecuaciones diferenciales no lineales cuya solución analítica general normalmente es imposible de obtener. Por esto es necesario, la obtención de soluciones particulares mediante su simulación.

Desde el punto de vista didáctico la simulación es una herramienta indispensable para la comprensión del comportamiento dinámico de los sistemas, ya sean mecánicos, eléctricos, fluidicos, térmicos o una combinación de estos. Históricamente la primera herramienta utilizada para realizar la simulación de los sistemas dinámicos fue el *computador analógico*. Mediante el "alambrado" de un circuito eléctrico análogo al sistema simulado se podía estudiar su comportamiento. La "programación" del computador requería, además de la interconexión de los bloques electrónicos, el escalamiento en tiempo y en

magnitud del modelo. La solución podía obtenerse bajo cualquier escala de tiempo, más rápida o más lenta que el sistema simulado e incluso a tiempo real. La solución mediante el uso del computador analógico proveía un alto grado de interacción del usuario que le permitía el análisis de casos (variación de parámetros) con mucha facilidad. El tiempo para realizar el estudio era menor que el requerido para el uso de los grandes *computadores digitales* de la época de los años 60 ó 70 con los que se trabajaba usualmente en tandas.

La necesidad de resolver grandes conjuntos de ecuaciones diferenciales no lineales, o de realizar la optimización de alguna condición o parámetro del sistema, originó el desarrollo de programas o *lenguajes de simulación* para los computadores digitales. Uno de gran éxito fue el *CSMP*<sup>[19]</sup> desarrollado por la IBM, el cual fue utilizado con muy buenos resultados tanto como herramienta didáctica y de investigación<sup>[1]</sup>.

El mejoramiento de la velocidad de los computadores digitales, así como la disminución de su precio y en especial la aparición del microcomputador en la década de los años 80, que permitió aumentar el



grado de interacción del usuario con el programa de simulación; incrementó el desarrollo de los programas de simulación digital y la sustitución casi por completo de la simulación analógica por la digital. Uno de los primeros programas de simulación adaptados al microcomputador personal fue el *TUTSIM*<sup>[5]</sup> desarrollado en la Universidad Tecnológica de Twente, Holanda, y cuya programación consistía en establecer un conjunto de ecuaciones obtenidas a partir de un diagrama de simulación similar al que se utilizaría para la simulación del sistema en un computador analógico.

La necesidad de contar con un programa de simulación para utilizarlo como herramienta didáctica en los cursos de control automático, instrumentación y laboratorios de control impartidos por el autor, originó el programa *SIMODI*<sup>[2][3]</sup>, el cual fue desarrollado a partir de los lineamientos presentados por Roach y Chow<sup>[17][18]</sup> de la Universidad de Adelaida, Australia, para el programa *MINISIM* y de otros tratados sobre simulación digital<sup>[10][13][14]</sup> y métodos numéricos<sup>[16]</sup>. A diferencia del *MINISIM* el cual fue desarrollado en FORTRAN para el computador CDC 6400, *SIMODI* fue programado en BASIC para utilizarse en un microcomputador, que permitía solucionar sistemas compuestos de hasta veinte ecuaciones diferenciales (veinte variables de estado), con veinte ecuaciones algebraicas (veinte variables auxiliares) y cuarenta parámetros variables, para lo que proveía siete métodos de integración numérica (seis de paso fijo y uno de paso variable), rutinas para simular tiempos muertos, funciones de entrada y facilidades para graficar hasta cuatro variables cualesquiera y realizar estudios de variación de parámetros.

Los cambios ocurridos en el sistema operativo de uso dominante en los microcomputadores hicieron necesario reemplazar el programa *SIMODI* como herramienta didáctica por un programa con una interfaz más "amigable". Se utilizaron entonces varias versiones de la opción demostrativa del programa *20-Sim*<sup>[8]</sup> desarrollado en la Universidad Tecnológica de

Twente, las cuales a pesar de su limitada capacidad (permiten simular sistemas de hasta quinto orden solamente) fueron adecuadas para los requerimientos didácticos de los cursos, pero no así para el trabajo de investigación.

Para utilizarlo como herramienta principal en un proyecto de investigación en el área de la automatización industrial, se ha obtenido para la Universidad una licencia académica del programa *VisSim*<sup>[21]</sup> de Visual Solutions. Esta licencia permite instalar el programa en los computadores con el fin que tanto profesores como estudiantes que estén realizando proyectos de investigación cuenten con su propia copia.

*VisSim* permite la simulación de sistemas continuos en el tiempo, discretos o híbridos por su facilidad de uso y poder de simulación se desean divulgar.

## 2. SIMULACIÓN Y CONTROL AUTOMÁTICO

El área de control automático integra la simulación digital como una herramienta poderosa para el estudio del comportamiento dinámico de los sistemas, tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia, para la optimización de controladores, el diseño de compensadores, etc. La necesidad de herramientas de simulación en esta área han originado el desarrollo entre otros, de programas como el *ControlStation*<sup>[9]</sup> de Doug Cooper para la enseñanza del control de procesos y el *ICTools*<sup>[11]</sup> del Instituto de Tecnología de Lund, Suecia, el cual provee un conjunto de herramientas altamente interactivas para el estudio de los sistemas de control. En los últimos años se ha empezado a utilizar también *Internet* para la docencia a distancia como en el *Laboratorio Virtual*<sup>[15]</sup> de la Universidad Politécnica de Brooklin, Nueva York, EUA o las herramientas de aprendizaje para los cursos interactivos de control<sup>[22]</sup> del Instituto de Tecnología de Lund.



El área particular del control automático *VisSim/Analyze*<sup>[20]</sup> provee un conjunto de herramientas de despliegue gráfico de gran utilidad para el diseño especialmente en el dominio de la frecuencia.

El *Directorio Anual de Programas* publicado periódicamente por la revista CEP<sup>[7]</sup> provee una amplia lista de los programas disponibles de simulación, y para el estudio en variedad de áreas de la ingeniería.

### 3. USO DEL PROGRAMA VISSIM

La simulación de un sistema utilizando el programa *VisSim* no requiere de programación alguna. El desarrollo de la simulación se realiza totalmente en un ambiente gráfico, cuya interfaz se muestra en la figura No. 1. Mediante la interconexión de los diferentes elementos que conforman el sistema, sean estos integradores, sumadores, funciones de transferencia, módulos aritméticos, funciones lógicas, funciones de excitación o elementos para mostrar las variables en forma numérica o gráfica (que pueden seleccionarse en una amplia biblioteca de bloques operacionales) se "arma" el diagrama por simular. En la figura No. 2. se muestran algunos de los bloques que se pueden utilizar así como la simulación de un pequeño diagrama de bloques.

Las *propiedades* de los diferentes bloques, como podrían ser los coeficientes de los polinomios en una función de transferencia o la forma de desplegar las variables en un bloque de salida gráfica, son accesibles por medio del menú o de los botones del "ratón" del computador.

En cuanto a las capacidades para la solución de los sistemas dinámicos, *VisSim* provee siete métodos de integración que incluyen dos de paso variable y tres métodos de optimización.

### 4. SIMULACIÓN CON VISSIM

A continuación se ilustrará el uso de algunas de las herramientas de simulación disponibles en

*VisSim* mediante la utilización de ejemplos sencillos.

#### 4.1 RESPUESTA EN EL TIEMPO

La forma más frecuente de estudiar el comportamiento de un sistema dinámico, es mediante la observación de la evolución en el tiempo de las variables, ante algún cambio en una de sus entradas, así como el efecto que sobre la respuesta pueda tener la variación de uno o más parámetros o condiciones iniciales del sistema.

Supongamos que se desea estudiar el efecto que tiene en los niveles y caudales el cambio del caudal de entrada en el sistema hidráulico de la figura No. 3, el cual incluye dos tanques y una tubería larga de interconexión entre los mismos.

Un posible procedimiento para el modelado del sistema es la obtención de la *red generalizada* que lo representa la cual es mostrada en la figura No. 4, a partir de la cual se pueden aplicar varios procedimientos - *Ley de incidencia de las pervariables*, *Ley de contorno de las transvariables* o *variables de estado* - para obtener el modelo a simular. El modelo para este sistema en particular y la utilización del concepto de red generalizada son presentados por Alfaro<sup>[4]</sup>.

En la figura No. 5 se muestra, para un conjunto arbitrario de parámetros, la variación de los niveles en los tanques cuando el caudal de entrada sufre un incremento a los 10 segundos y luego un decremento a los 60 segundos. En este caso, se utilizó como método de integración el Runge-Kutta de 4° orden con un paso de 0.01 segundos y un intervalo de solución de 0 a 120 segundos.

La facilidad de tener gráficos sobreimpuestos permite además ver en un mismo gráfico el efecto que tiene la variación de alguno de los parámetros del sistema, por ejemplo la apertura de una de las válvulas.



## 4.2 ENCAPSULAMIENTO - BLOQUES COMPUESTOS

Para facilitar el desarrollo del diagrama de simulación de sistemas complejos *VisSim* provee la facilidad de crear *bloques compuestos*, esto es *encapsular* uno o más bloques en uno solo, permitiendo así la creación de una estructura jerárquica de bloques dentro del modelo. Este proceso modular de simulación permite crear un modelo complejo a partir de bloques más sencillos, así como el desarrollo de bibliotecas de modelos o bloques básicos de simulación, ya que un bloque compuesto se puede guardar en un archivo independiente para ser incorporado posteriormente en más de un diagrama de simulación. Los bloques compuestos pueden protegerse de un cambio o modificación, al permitir que sean de solo lectura e incluso se puede impedir el inspeccionar su contenido mediante el uso de una contraseña de acceso.

En la figura No. 6 se muestra el diagrama de simulación de un sistema de control en el que se utiliza un controlador PID ideal. El controlador está representado por un bloque - *Cont\_PIDisa* - que muestra solamente sus entradas y su salida. Si el usuario pasa al interior del bloque del controlador adquiere acceso a sus parámetros de ajuste como se muestra en la figura No. 7, sin embargo, las ecuaciones que lo modelan están contenidas en un bloque - *PIDisa* - en un nivel más interno todavía. El usuario no tiene que preocuparse por la implementación del controlador, al respecto puede variar libremente los valores de los parámetros del mismo y estudiar el comportamiento del sistema. El permitir el acceso o no a la estructura interna del controlador, dependerá solamente de la voluntad del realizador.

## 4.3 ESTUDIOS EN EL PLANO DE FASE

Una herramienta de estudio aplicable tanto a los sistemas lineales como a los no lineales es el análisis en el *plano de fase*, técnica no empleada con frecuencia a pesar de su utilidad.

Un ambiente computacional para el estudio de las trayectorias en el plano de fase es el *Phase Space Navigator*<sup>[6]</sup> desarrollado en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, EU.

En *VisSim* se puede designar una variable de entrada a un bloque de salida gráfica como la abscisa del mismo en vez del tiempo, lo cual permite el estudio del movimiento de las variables en el plano a medida que avanza el tiempo.

Consideremos por ejemplo, el problema de llevar un sistema dinámico dado por:

$$\dot{x} = Ax + bu \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

desde cualquier estado inicial  $x_0$  hasta el origen en un tiempo mínimo con  $|u(t)| \leq 1$

La solución de este *problema de control óptimo de tiempo mínimo*<sup>[12]</sup> es bien conocida. La ley de control óptima consiste de un control "bang-bang" con una curva de conmutación dada por  $s(x(t)) = x_1(t) + 1/2 x_2(t)x_2(t)$ .

En la figura No. 8 se muestran las trayectorias que describen los estados  $(x_1, x_2)$  en el plano a partir de diferentes puntos iniciales, y se puede observar claramente que cuando estos alcanzan la curva de conmutación, la trayectoria óptima sigue sobre ésta hasta llegar al origen.

## 4.4 VISSIM/ANALYZE-HERRAMIENTAS DE CONTROL

En el estudio de los sistemas de control, respecto al dominio de la variable compleja o de la frecuencia, existen varias técnicas gráficas que son de gran utilidad. El *lugar de las raíces*, los *diagramas de Bode* y el *diagrama de Nyquist* permiten observar el efecto que la variación de un parámetro del



sistema de control, usualmente la ganancia del controlador, tiene sobre el comportamiento dinámico del mismo, su estabilidad o robustez.

Utilizando *VisSim/Analyze* se puede obtener una aproximación lineal tanto en el dominio del tiempo como en de la frecuencia de un sistema no lineal. El comando "*Linearize*" genera las matrices **ABCD** del espacio-estado para un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas y el "*Transfer Function Info*" provee los polinomios del numerador y denominador, los ceros y polos de la función de transferencia del sistema linealizado. La obtención del *lugar de las raíces*, el *diagrama de Nyquist* o los de *Bode*, así como el diseño de *compensadores* está disponible a través del menú.

La figura No. 10 muestra los resultados de la simulación del control proporcional del sistema de tercer orden de la figura No. 9: la respuesta en el tiempo del sistema con un controlador de ganancia 10, el movimiento de los polos de lazo cerrado en el plano complejo (*lugar de las raíces*) y los gráficos de magnitud y fase (*diagramas de Bode*) de la función de transferencia de lazo abierto con ganancia unitaria.

#### 4.5 OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS

Existen muchos problemas en ingeniería que requieren minimizar o maximizar una función de costo, como por ejemplo determinar el diámetro óptimo de una tubería considerando su costo y las pérdidas de energía que ocasiona, o minimizar la cantidad de material requerido para fabricar un recipiente de determinada forma geométrica y un volumen fijo. En todos ellos uno o más parámetros del sistema pueden variarse para lograr el valor óptimo de la función de costo.

Considérese el sistema de control mostrado en la figura No. 11. Se desea determinar el conjunto de parámetros ( $K_c$ ,  $T_i$ ) del controlador PI que minimicen la *integral del valor absoluto del error (IAE)*. Este problema de optimización de parámetros puede resolverse

en *VisSim* definiendo la función de costo - "*cost*" - *IAE* en este caso, y los parámetros por optimizar - "*parameterUnknown*" -  $K_c$  y  $T_i$ . A partir de una estimación inicial el programa en forma iterativa variará los parámetros desconocidos en busca de un mínimo para la función de costo. *VisSim* provee tres métodos de optimización para este fin.

En este ejemplo se empleó el método de optimización de Powell y se incluyeron bloques para el despliegue de los valores óptimos de los parámetros y del mínimo de la función de costo.

#### 5. CONCLUSIONES

Mediante el uso de ejemplos sencillos se han presentado algunas de las capacidades de simulación disponibles en el programa *VisSim*. Su uso como herramienta didáctica en los cursos relacionados con el estudio de los sistemas dinámicos, así como en los proyectos de graduación de los estudiantes o de investigación se considera muy importante. La forma totalmente gráfica en la que se prepara el diagrama de simulación, la no necesidad de programación y las facilidades provistas por el programa, hacen que la curva de aprendizaje de su utilización sea muy corta, razones que esperamos interesen a otros en la comunidad universitaria para hacer uso del mismo.

#### 6. BIBLIOGRAFÍA

1. Alfaro, V.M. - La simulación digital mediante el uso del programa CSMP/S360", Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica, 1978.
2. Alfaro, V.M. - "Programa de Simulación de Modelos Dinámicos (SIMODI) - Manual del Usuario" Versión 2.5, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, 1986; Versiones 3.0 a 5.0, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica, 1989-94.



3. Alfaro, V.M. - "Simulación de Sistemas Dinámicos en un Microcomputador", Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, 1987.
4. Alfaro, V.M. - "La red generalizada", Ingeniería (Costa Rica), Vol. 1 N° 2, 1991.
5. Applied i - "TUTSIM User Manual for the IBM PC Computer", Palo Alto, CA, EUA, Applied i, 1984.
6. Bradley, E. y F. Zhao - "Phase - Space Control System Design", IEEE Control Systems Magazine (EUA), pág. 39 - 46, Abr. 1993.
7. Chemical Engineering Progress - "CEP Annual Software Directory 1998", Suplemento a Chemical Engineering Progress (EUA), Vol. 94 N° 1, 1998.
8. Controllab Products, B. V. - "20-Sim Reference Manual Version 3.1", Twente, Enschede, Holanda, Control Laboratory, University of Twente, Jul. 2000.
9. Cooper, D.J. - "Control Station - Software For Process Control Training, Tuning & Analysis, User Guide Version 2.5", Douglas J. Cooper, 2000.
10. Guy, J.L. - "Modeling process systems via digital computers", Chemical Engineering (EUA), Mar. 8, 1982.
11. Johansson, M., M. Gäfvert y K.J. Aström, "Interactive Tools for Education in Automatic Control", IEEE Control Systems Magazine (EUA), Jun. 1998.
12. Kirk, D.E. - "Optimal Control Theory - An Introduction", Englewood Cliffs, N.J. EUA, Prentice-Hall, Inc., 1970.
13. Kochenburger, R.J. - "Computer Simulation of Dynamic Systems", Englewood Cliffs, N.J., EUA, Prentice-Hall, Inc., 1972.
14. Korn, G.A. y J.V. Wait - "Digital Continuous System Simulation", Englewood Cliffs, N.J., EUA, Prentice-Hall, Inc., 1978.
15. Overstreet, J.W. y A. Tzes - "An Internet-Based Real-Time Control Engineering Laboratory", IEEE Control Systems Magazine (EUA), Oct. 1999.
16. Ralston, A. - "A First Course in Numerical Analysis", New York, N.Y., EUA, McGraw-Hill Book, Co., 1965.
17. Roach, J.R. y E.P. Chow - "An interactive digital simulation and optimization package: FORTRAN programs MINISIM and OPTISIM", Simulation (EUA), Vol. 25 N° 4, Oct. 1975.
18. Roach, J.R. - "Notes on the use of MINISIM & OPTISIM", Department of Chemical Engineering, The University of Adelaide, Australia, 1976.
19. Speckhart, F. y W.L. Green - "A Guide to Using CSMP - The Continuous System Modeling Program", Englewood Cliffs, N.J., EUA, Prentice-Hall, Inc., 1976.
20. Visual Solutions - "VisSim/Analyze User's Guide Version 3", Westford, MA, EUA, Visual Solutions, 1997.
21. Visual Solutions - "VisSim User's Guide Version 3", Westford, MA, EUA, Visual Solutions, 1999.
22. Wittenmark, B. H. Haglund y M. Johansson - "Dynamic Pictures and Interactive Learning", IEEE Control Systems Magazine (EUA), pág. 26 - 31, Jun. 1998.



## Sobre el Autor

## Víctor M. Alfaro

Profesor Asociado, Departamento de Automática, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica

Apartado postal 1122, 2050 San Pedro, San José, Costa Rica

Tel. 234.2494

Fax. 280.6370

correo electrónico: varimex@sol.racsa.co.cr

*El presente trabajo fue realizado como parte del proyecto N° 731-A0-169 inscrito en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica.*

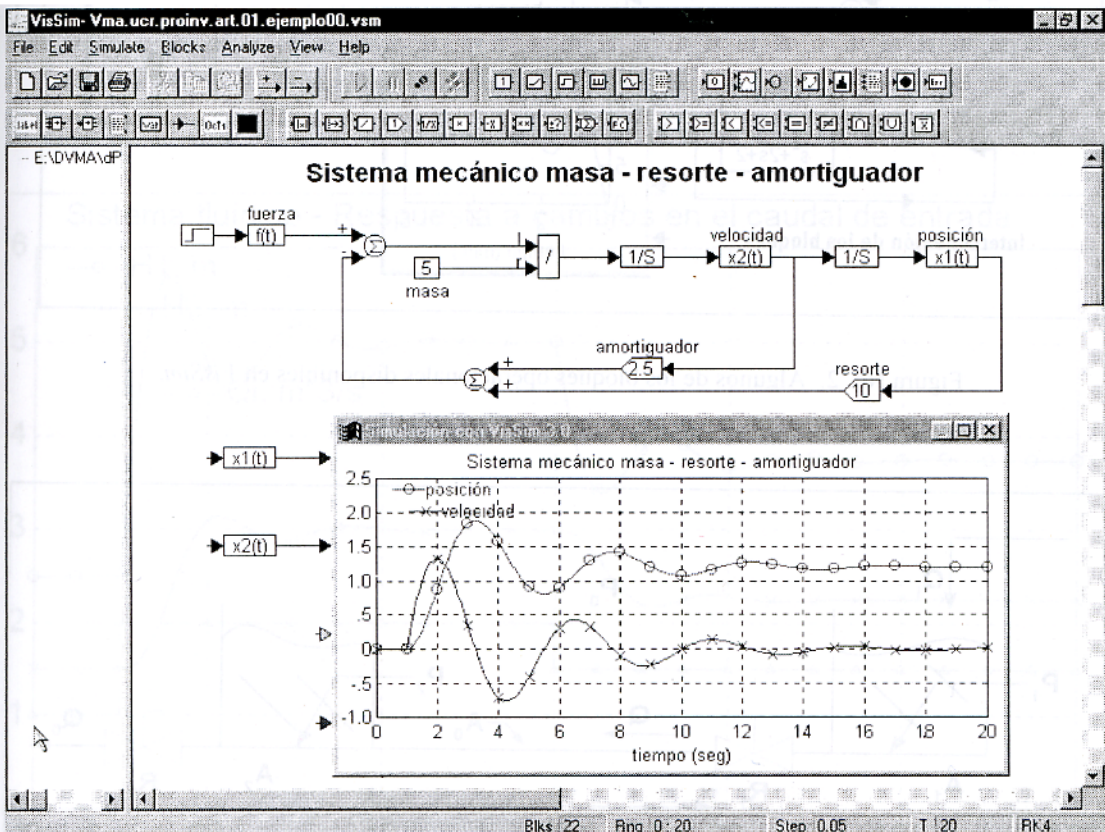


Figura No. 1. Interfaz principal del programa *VisSim*.



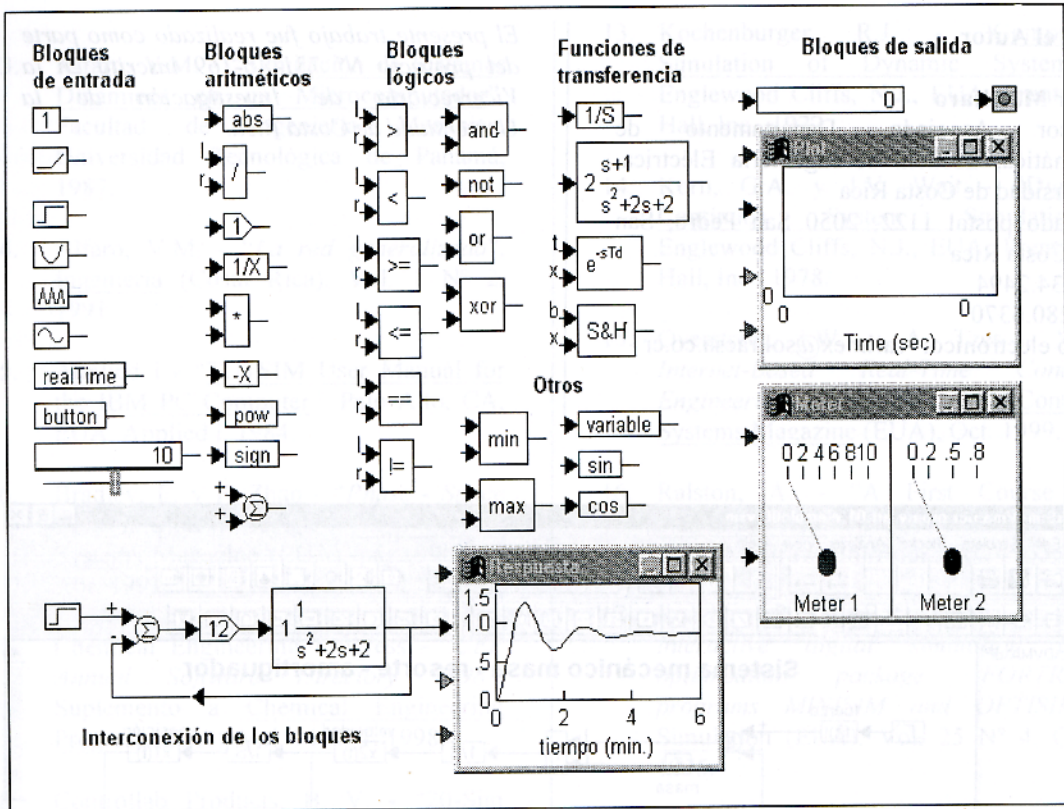


Figura No. 2. Algunos de los bloques operacionales disponibles en VisSim.

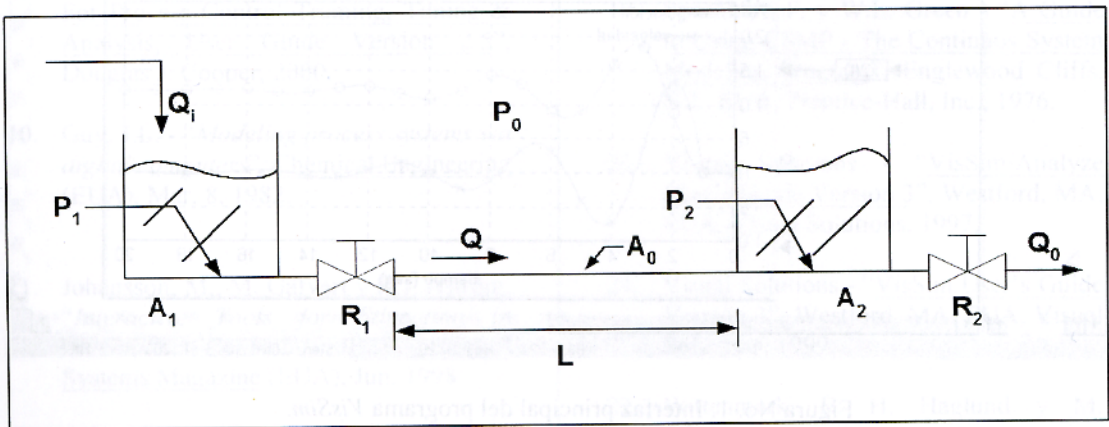


Figura No. 3. Sistema Fuidico.



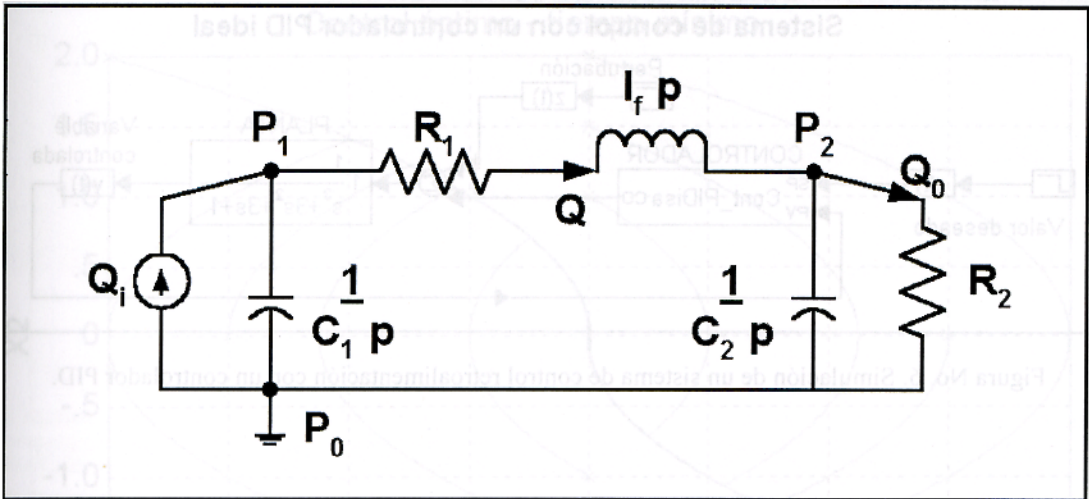


Figura No. 4. Red generalizada del sistema hidráulico.

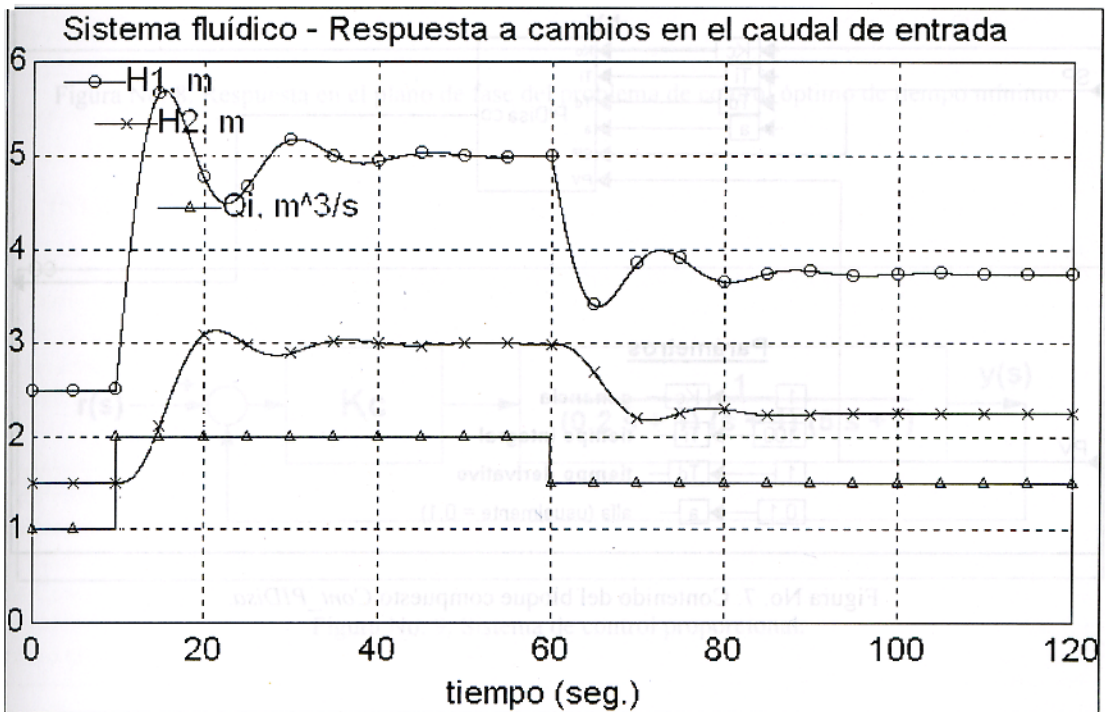


Figura No. 5. Curvas de repuesto en el tiempo del sistema hidráulico.



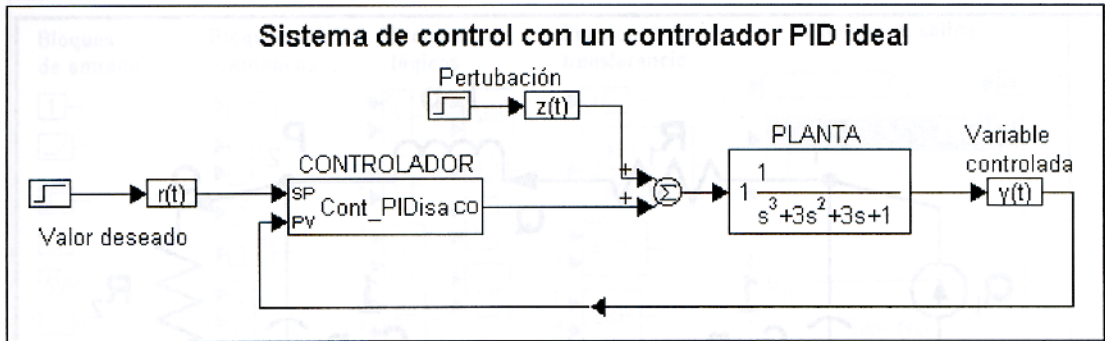


Figura No. 6. Simulación de un sistema de control retroalimentación con un controlador PID.

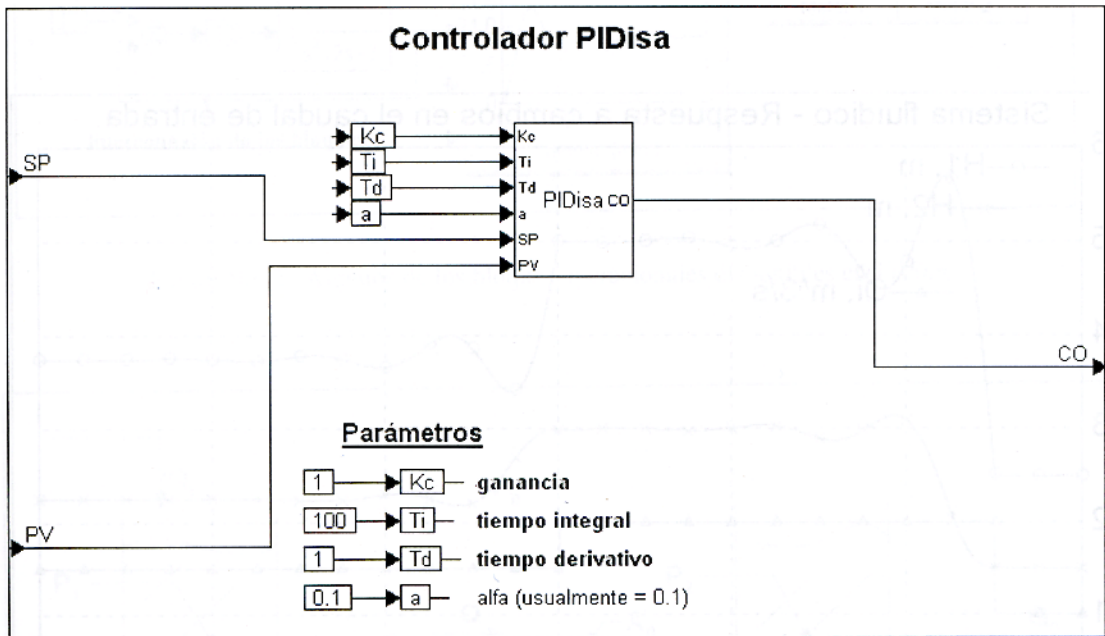


Figura No. 7. Contenido del bloque compuesto *Cont\_PIDisa*.



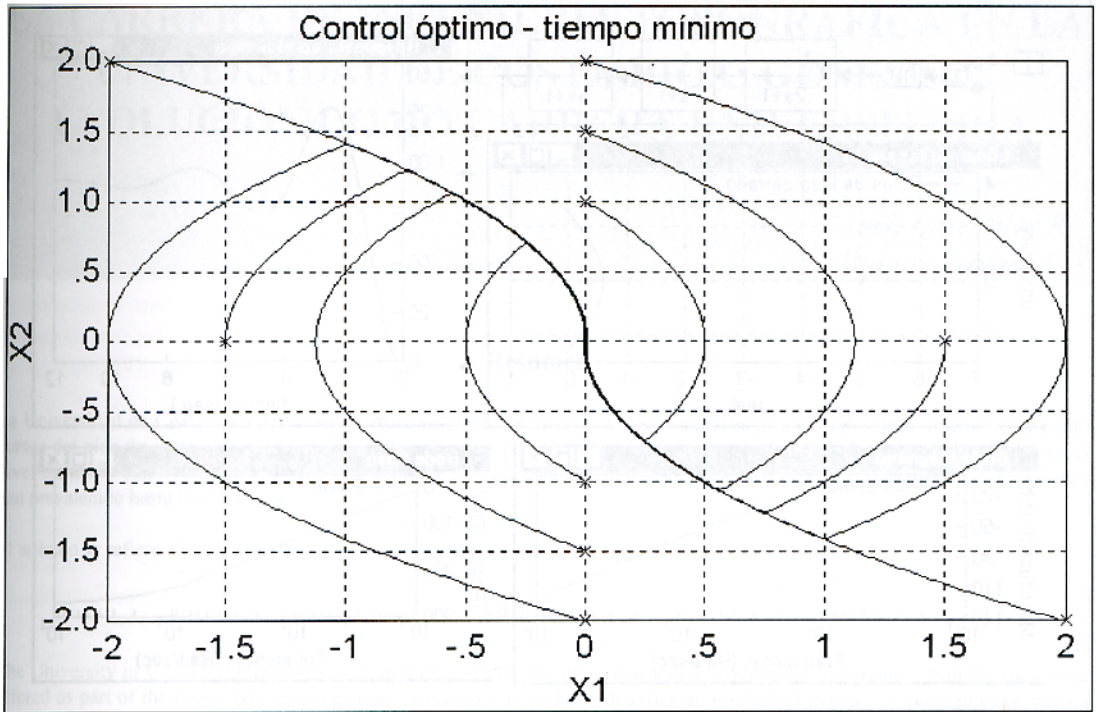


Figura No. 8. Respuesta en el plano de fase del problema de control óptimo de tiempo mínimo.

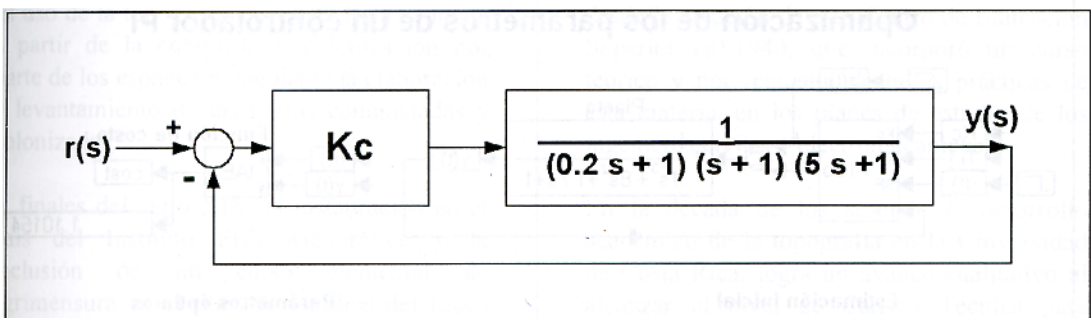


Figura No. 9. Sistema de control proporcional.



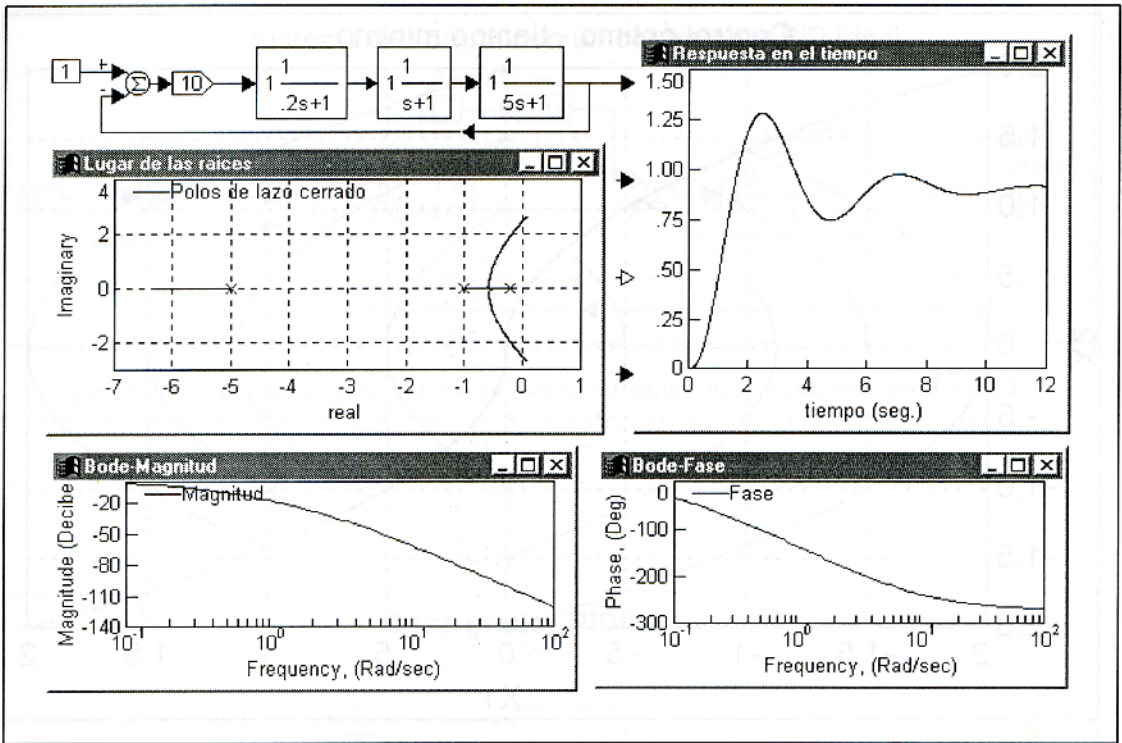


Figura No. 10. Gráficos para el estudio del sistema de control de la figura No. 9.

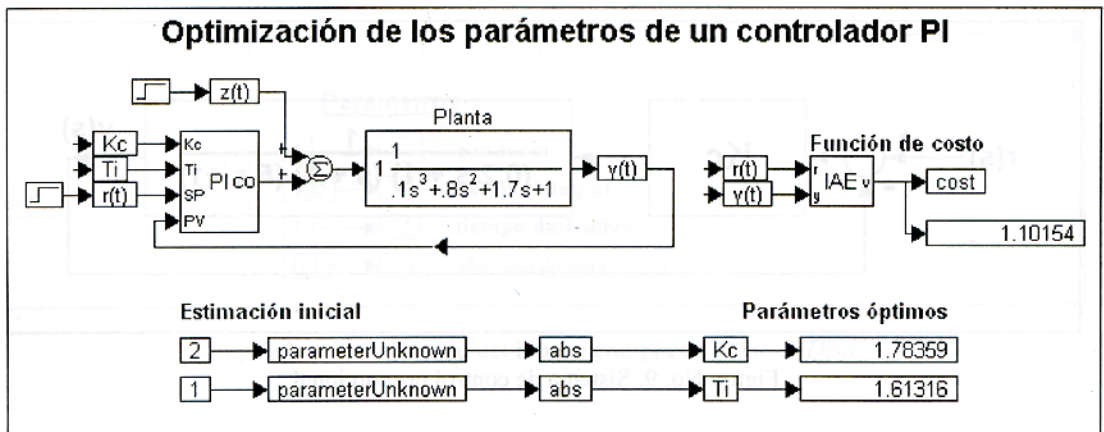


Figura No. 11. Uso de las herramientas para la optimización de parámetros.