SISTEMA EXPERTO PARA CONTROL DE PROCESOS

Ing. Rafael Fierro Brito, MSc
Escuela Politécnica Nacional

RESUMEN

Este trabajo describe el diseño de un ***sistema experto*** que supervisa y controla un proceso. Cuatro algoritmos independientes de control fueron implementados, los cuales son activados secuencialmente. El Sistema de Control Experto utiliza la información de su base de conocimiento, del funcionamiento de la planta y las limitaciones físicas del actuador, para escoger la mejor acción de control en cada intervalo de muestreo.

El sistema fue implementado en ***lenguaje C*** y consiste en varios módulos los que son supervisados por un programa principal, estos son: Interface de Usuario, Algoritmos de Control, Simulación del Proceso y Control Experto.

Para verificar la validez y limitaciones del Sistema de Control Experto se utilizaron varias simulaciones de procesos comunmente encontrados en la industria

ABSTRACT

This project is concerned with the design of an expert system, for supervising and controlling a process. Four independent control algorithms were implemented. They are sequentially activated. Thus, the Expert Control System uses the information from the performance of the process, the physical limitations of actuator and its structured knowledge base in order to choose the best control action in each sampling interval.

The program was implemented on a personal computer under the MS-DOS operating system using *Quick C* programming language. It consists of several modules which are supervised by a main program. These are: User Interface which allows the communication between the user-computer and controls the input/output devices. Controller block module, where the control algorithms were implemented. Process Simulation and the Knowledge-based Expert Control.

To verify the validity and limitations of the knowledge-based expert control, various simulations were used which represent physical processes commonly found in industry.

1. INTRODUCCION

Sistemas Expertos como una rama de ***Inteligencia Artificial*** es un fascinante campo de investigación. Hay un cresciente interés de usar esta tecnología en el dominio de control automático especialmente en procesos donde es difícil encontrar un modelo matemático o su dinámica es **muy compleja. Métodos** convencionales **para controlar esta clase** de sistemas usualmente **fallan, por lo** tanto esta actividad debe **ser llevada a** cabo por un operador ***experto***. **Pero los** expertos son escasos y no siempre **están** disponibles cuando acurre un problema. Así, el objetivo de un Sistema de Control Experto es desarrollar un controlador *inteligente* que mantenga la estabilidad y adecuado funcionamiento del proceso, no sólo en operación normal de la planta sino también en presencia de perturbaciones.

En el área de Control Experto, existen dos tendencias de investigación. La primera se la denomina **Control Basado en Conocimiento** que intenta obtenber un óptimo ajuste de parámetros sobre un controlador adaptivo convencional. La segunda tendencia se la denomina **Control Basado en Reglas**, este método simula y automatiza la abilidad que tiene un experimentado operador en controlar una planta manualmente.

Este artículo se encuentra estructurado en cuatro secciones. La primera, menciona algunas características de Sistema Expertos aplicados al dominio de control de procesos. Luego se describen los aspectos más relevantes de la presente implementación, su arquitectura, la adquisición y representación del conocimiento y los algoritmos de control utilizados. La tercera sección presenta un caso de estudio sobre el que fue probado el Controlador Experto, finalmente, se indican algunas conclusiones y comentarios sobre el sistema diseñado.

2. SISTEMA DE CONTROL EXPERTO

2.1 CONCEPTOS BASICOS

Sistemas Expertos son una de las más exitosas subdisciplinas de ***Inteligencia Artificial***: rama de ciencias de computación que considera el diseño y la implementación de programas que son capaces de tener un comportamiento **inteligente** que simulan abilidades humanas tales como resolución de problemas y teoremas, procesamiento de lenguaje, etc. Un Sistema Experto puede ser definido como: (Parsaye, K., 1988)

"Un Sistema Experto es un programa que considera un bloque de conocimiento para realizar alguna tarea complicada que usualmente es realizada sólo por un *experto humano*. La principal fuerza de un sistema experto proviene de su base de conocimiento acerca del problema en estudio más que de algoritmos de búsqueda

y métodos de razonamiento. Un sistema experto, exitosamente trata problemas para los cuales claras soluciones algorítmicas no existen."

Los principales módulos que conforman un típico sistema experto se muestran en la Fig. 1.

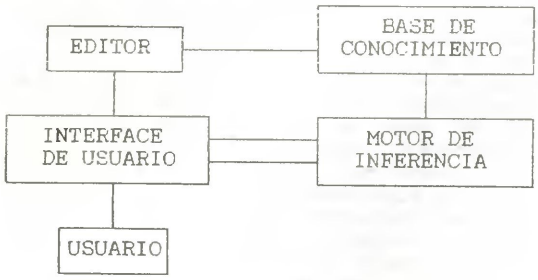


Fig. 1: Estructura de un Sistema Experto

La ***interface de usuario*** permite que el programa se comunique con el mundo exterior a través de menús, preguntas y respuestas en lenguaje natural, gráficos. Puede tener un editor de texto para crear, modificar y actualizar la base de conocimiento.

El corazón del sistema experto es su ***base de conocimiento*** la cual está compuesta de hechos y reglas acerca de un particular dominio de conocimiento, representado en la forma **IF** (*condición*)... **THEN** (*acción*).

El ***motor de inferencia*** es el intérprete de la base de conocimiento, el procesa las reglas que permiten llegar a conclusiones, esto puede ser realizado de acuerdo a diferentes estrategias de búsqueda y razonamiento definidas en Inteligencia Artificial.

El rango de aplicaciones de sistemas expertos se incrementa día a día, ahora, existen muchos de ellos que funcionan en computadores personales, los mismos que varían en costo, complejidad y puden ser encontrados en casi todos los campos de ciencia y tecnología, tales como: medicina, electrónica y computación, geología, química, matemáticas, administración de empresas, educación y entrenamiento, aplicaciones militares, control de procesos, etc.

Aun cuando sistemas expertos han sido aplicados con mucho éxito a un sinnúmero de campos, no es posible sobreestimar sus capacidades, ya que todavía no se ha obtenido un grado de investigación profundo, algunas limitaciones pueden incluir:

- Dificultad de adquirir el adecuado conocimiento dentro de un dominio.
- Deficiencias en verificación de la confiabilidad del programa, especialmente, cuando es aplicado a sistemas muy complejos como reactores nucleares.
- Presentan un bajo grado de aprendizaje de experiencias pasadas. Explicaciones estan limitadas a describir los pasos seguidos al encontrar una solución.
- Sistemas expertos actuales todavia presentan deficiencias en robustez y flexibilidad.

2.2 SISTEMAS EXPERTOS EN CONTROL DE PROCESOS

Aunque la teoría clásica de control da soluciones para la mayoría de los problemas prácticos de control. Existen, sin embargo, muchos sistemas reales para los cuales técnicas convencionales no son una adecuada respuesta. Estos problemas con frecuencia pueden ser encontrados cuando la planta es muy grande, compleja y sujeta a falla de componentes.

Para incrementar la confiabilidad del sistema, es de gran importancia la abilidad y experiencia del operador, especialmente cuando el proceso está sujeto a perturbaciones aleatoreas, falla de componetes o severas condiciones de operación. Por lo tanto, es deseable diseñar un controlador en tiempo-real que responda como lo haría un experimentado operador en precencia de contingencias que afectan al comportamiento del sistema. Esto, sólo se lograría si el controlador incorpora algunas del las características y abilidades del operador. Este tipo de controlador podría ser llamado ***Controlador Experto (CE)***, cuya estructura básica es presentada en la Fig. 2.

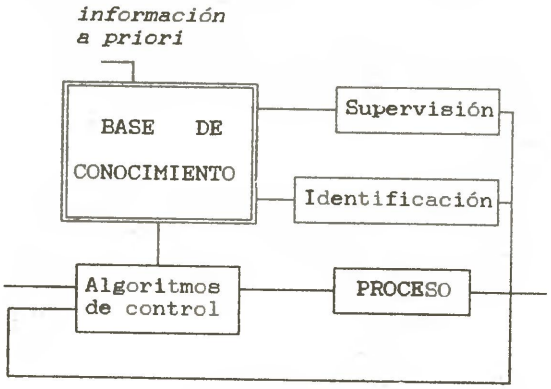


Fig. 2: Controlador Experto

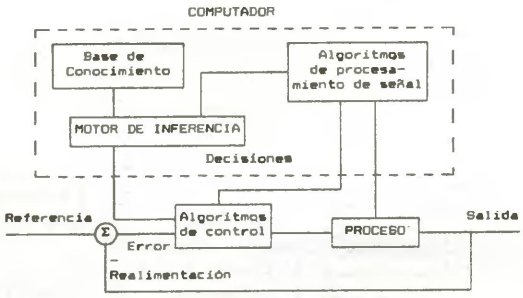
Existen dos clases principales de control experto:

1.- Control Basado en Conocimiento (KBC por sus siglas en inglés), el cual combina las técnicas de sistemas expertos, algoritmos de control convencional, algoritmos de identificación y supervisión para obtener un controlador **inteligente**.

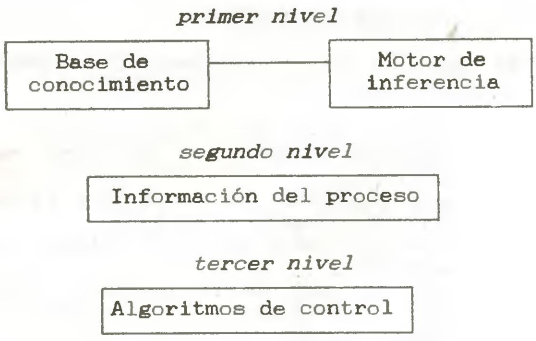
2.- Control Basado en Reglas (*Fuzzy Logic*), este método intenta simular la abilidad de control manual de un operador, para lo cual emplea un conjunto de reglas para escojer la estrategia de

control en diferentes situaciones, reemplazando a los algoritmos convencionales de control. Esta técnica ha sido aplicada en la industria del cemento permitiendo la optimización de energía en el proceso, por lo que la inversión en la implementación del sistema experto es recuperada a corto plazo.

Este trabajo se enmarca en la primera categoría, donde el controlador consiste de una base de conocimiento, un motor de inferencia en tiempo real, interface en tiempo real para conocer la información de la planta y varios algoritmos de control. La estructutra del Controlador Experto Basado en Conocimiento se indica en la Fig. 3.a.



(a)



(b)

Fig. 3: (a) Estructura. (b) Organización jerárquica del Control Experto Basado en Conocimiento

Los componentes del sistema son localizados en una estructura jerárquica, Fig. 3.b. donde el nivel más alto está compuesto tanto por la base de conocimiento como por el motor de inferencia, en este nivel se lleva a cabo la toma de decisiones, detección de falla en los componentes, diagnóstico y selección del esquema de control. La información del estado actual del sistema se encuentra en el segundo nivel de jerarquía, donde las mediciones sobre el proceso se convierten en un conjunto de señales que describen el comportamiento del sistema. Finalmente el nivel más bajo contiene los algoritmos de control.

Este tipo de control tiene tres problemas principales a ser resueltos. Primeramente, cómo debería ser adquirido el conocimiento, en segundo lugar, la representación de este conocimiento, y la implementación del hardware y software que sean capaces de trabajar en tiempo real.

2.3 CONTROL EXPERTO EN TIEMPO REAL

El objetivo final de un *Sistema de Control Experto* es ser aplicado al mundo real, para lo cual deben satisfacer ciertos requerimientos, tales como:

- El sistema debe ser capaz de responder a eventos asincrónicos y a peticiones del usuario, dentro de cierto intervalo de tiempo.
- Un sistema de control experto en tiempo real debería combinar características como auto-ajuste y adaptación con supervisión y monitoreo.
- Una deseable característica es el procesamiento paralelo, lo que implica el uso de un sistema operativo concurrente.
- Debería ser capaz de trabajar con información inexacta.
- Los datos pierden validez con el tiempo ya que el estado del sistema cambia. El controlador experto debería considerar este aspecto.
- Finalmente, la velocidad de ejecución de las tareas debe ser lo suficientemente alta, para lo cual se requiere un software y hardware adecuados y más complejos.

Hasta ahora no existe un Sistema Experto en Tiempo Real que cumpla con todos los requerimientos mencionados, pero existen productos comerciales que los satisfacen en cierto grado. Algunos sistemas expertos disponibles actualmente en el mercado son:

PICON, desarrollado por LISP Machine Inc. para diagnóstico de fallas en un proceso.

EXACT, producto de FOXBORO, basado en técnicas convencionales de identificación para ajustar un controlador PID adaptivo.

ESAC, es un regulador auto-ajustable que emplea técnicas de sistemas expertos.

RESCU, sistema experto orientado a tareas de control de calidad.

HEXCON, es un sistema híbrido, que combina control computarizado

convencional y técnicas de sistemas basados en conocimiento. Es implementado en PASCAL y utiliza el microprocesador 8086.

MUSE, es un paquete de desarrollo de sistemas en tiempo real basados en conocimiento, diseñado por Cambridge Consultants Ltd.

ART, paquete de desarrollo de Inteligencia Artificial orientado a control.

G2, es uno de los más populares sistemas expertos en tiempo real aplicados a procesos industriales.

También existen muchas aplicaciones *off-line*, es decir que no se conectan directamente al proceso sino que se las utiliza como herramientas de desarrollo y diseño de sistemas de control experto.

3. IMPLEMENTACION

El objetivo de este trabajo fue el desarrollo de un sistema basado en conocimiento para controlar un proceso lineal arbitrario. Técnicas convencionales de control fueron combinadas con la tecnología de sistemas expertos para producir un esquema de control adaptivo, el cual consiste en cuatro bien conocidos algoritmos clásicos de control supervisados por el controlador experto.

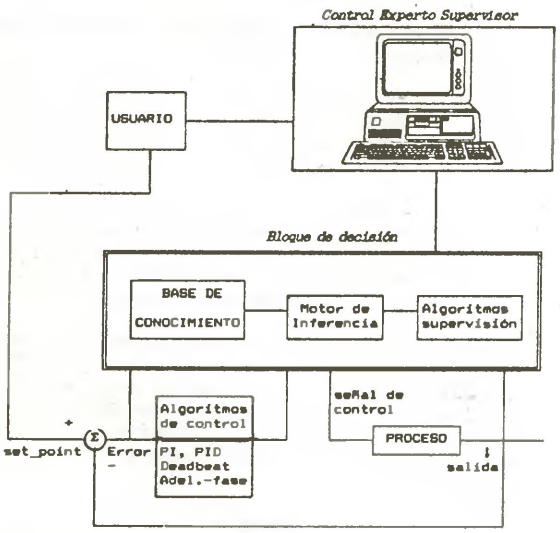


Fig. 4: Arquitectura del Controlador Experto

El control experto utiliza la información de su base de conocimiento, el comportamiento del proceso y las salidas de los controladores para decidir cual acción de control conectar a la planta, es decir el sistema de control experto actúa como un multiplexer.

La arquitectura del sistema propuesto se muestra en la Fig. 4. El componente más importante es la base de conocimiento, donde la información procedente de la planta y de los controladores es procesada. Otros componentes son: el bloque de controladores, el actuador, entrada de referencia y el proceso a controlar.

El sistema experto decide cual es la *mejor* señal de control a ser conectada al proceso en cada intervalo de muestreo, pudiendo considerarse como un switch de múltiples entradas y una salida, como se muestra en la Fig. 5. Las entradas son las salidas de los controladores y la salida es la real señal de control que actúa sobre la planta. Los controladores que se implementaron fueron: PI, PID, Deadbeat y Adelanto de Fase.

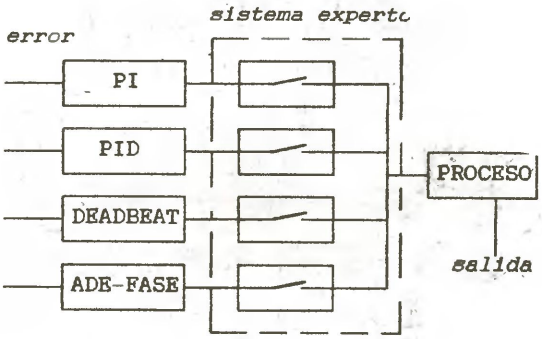


Fig. 5: Controlador Experto

3.1 BASE DE CONOCIMIENTO

El objetivo de este trabajo fue diseñar un controlador:

- que pueda controlar satisfactoriamente un proceso arbitrario.
- que produzca una respuesta rápida con sobreimpulso aceptable.
- que considere las limitaciones del actuador.
- que la base de conocimiento pueda ser facilmente modificada y actualizada.

Para lograr este objetivo, fue necesario un período de adquisición de conocimiento sobre las características del proceso y la experiencia de un ingeniero en control. De esta forma se codificó una Base de Conocimiento que intenta extraer las mejores características de algoritmos de control clásico los mismos que al ser conectados al proceso, en el momento adecuado, producen una respuesta satisfactoria.

En la mayoría de los casos la información disponible es: la respuesta del sistema, el error y su derivada y la salida del controlador. El sistema propuesto emplea esta información para definir en que sección de la respuesta temporal debería ser conectado uno de los controladores.

La siguiente fase es representar este conocimiento mediante un conjunto de reglas de la forma IF (*condición*) ..THEN (*acción*). Para lo cual se consideró una señal de error *ideal*: sin sobreimpulso, sin error estacionario de posición y con un tiempo de establecimiento pequeño. El error real del sistema deberá aproximarse lo más posible a la respuesta ideal, para lo cual fue dividido en diferentes zonas sobre las que actuarán diferentes reglas. Fig. 6.

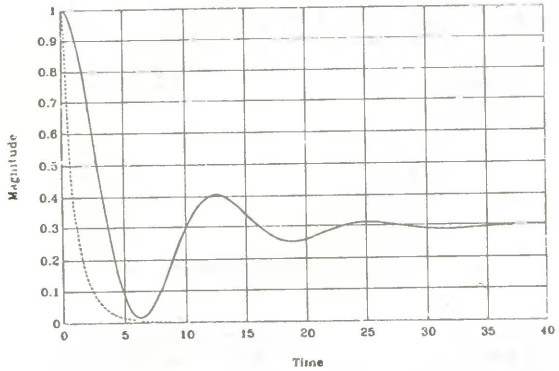


Fig. 6: Error del sistema ideal (...) y real (-).

Desafortunadamente, la dinámica del sistema, los polos y ceros adicionales del controlador, la presencia de ruido, las limitaciones físicas del actuador y la calidad de los sensores son factores que afectan el comportamiento del sistema. Las reglas que se indican a continuación, tratan de minimizar estos aspectos negativos e intentan llevar, la característica del error del sistema a una que se aproxime a la ideal:

1) IF *Tipo de Sistema* = 0
THEN *Controlador* = PI
ELSE *Controlador* = Adelanto-fase

2) IF *si cambia el set_point*
OR *error* > 0.9 (Δset_point)
THEN *Controlador* = Deadbeat

3) IF *error* > 0.2 (Δset_point)
AND δ *error* < 0
THEN *Controlador* = PID

4) IF $|error|$ < 0.2 (Δset_point)
THEN *Controlador* = PI (Adelanto-fase)

5) IF δ *error* > 0
AND *error* > 0.2 (Δset_point)
THEN *Controlador* = max(PI o Adelanto-fase, PID)

6) IF *error* < - 0.2 (Δset_point)
THEN *Controlador* = min(PI o Adelanto-fase, PID)

7) IF *señal de control* > U_limit
THEN *señal de control* = U_limit
ELSE *señal de control* < - U_limit
THEN *señal de control* = - U_limit
ELSE *use la misma señal de control*

Como resultado de aplicar estas reglas el error del sistema puede ser clasificado en cinco diferentes zonas:

1.- error > 0.9 set_point
control = Deadbeat

2.- δ error < 0
y error > 0.2 set_point
control = PID

3.- abs(error) < 0.2 set_point
control = PI o Adelanto-fase

4.- δ error > 0
y error > 0.2 set_point
control = max(PI o Adelanto-fase, PID)

5.- error < - 0.2 set_point
control = min(PI o Adelanto-fase, PID)

3.2 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

La estructura del programa satisface la arquitectura del sistema anteriormente indicada. Así, cada componente puede ser representado por un módulo que es supervisado por un programa principal, como se muestra en la Fig. 7.

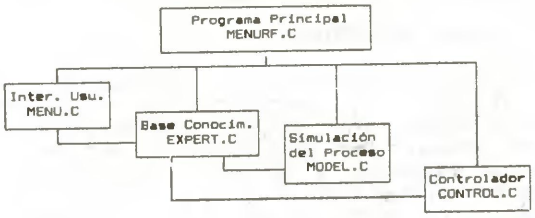


Fig. 7: Estructura modular del programa.

La *interface de usuario* permite la comunicación entre el computador y el mundo exterior, permitiendo el ingreso de datos y selección de opciones a través de menús. Otro módulo, permite la simulación de un proceso lineal con/sin retardo de transporte, mediante la utilización de la Rutina de Cuarto Orden de Runge-Kutta.

En el bloque de controladores, Fig. 8, fueron implementados los equivalentes discretos de cuatro algoritmos de control convencionales, estos fueron: PI, PID, Adelanto de Fase y Deadbeat, éste último tiene la propiedad de llevar todos los estados del sistema a cero en máximo ***n*** intervalos de muestreo ***T*** (donde ***n*** es el orden del sistema), es decir el tiempo de establecimiento del sistema será ***nT***, esto puede ser logrado con un controlador por cancelación, escogiendo todos los polos deseados sobre el origen del *plano_z*, su principal desventaja es la elevada señal

de control inicial.

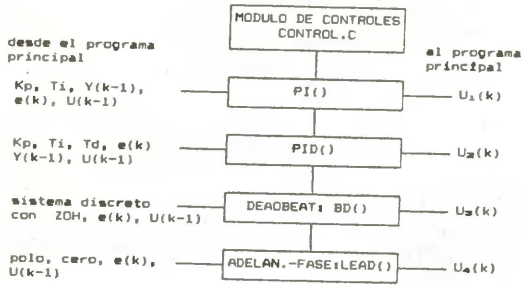


Fig. 8: Módulo de Controladores

Finalmente, se tiene el módulo que integra el ***control experto***, donde se encuentra la base de conocimiento expresada por un conjunto de reglas, que escojen la ***mejor*** señal de control a ser aplicada a la planta.

El Sistema de Control Experto fue probado sobre varias simulaciones. En la siguiente sección se presenta una de ellas que corresponde a un control de temperatura en un tanque.

4. CASO DE ESTUDIO

La Fig. 9 muestra el sistema a ser controlado. La temperatura en el fluido de entrada es controlada por una válvula que regula las cantidades relativas de agua caliente y fría. Debido a la distancia que existe entre la válvula y el punto de descarga dentro del tanque, existe un tiempo de retardo.

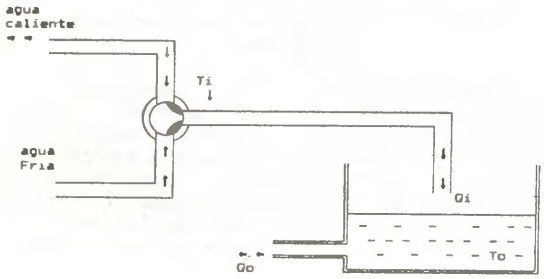


Fig. 9: Control de temperatura en un tanque

La ecuación diferencial que gobierna el sistema es:

$$T_o'(t) + a\, T_o(t) = a\, T_i(t - \tau_d)$$

donde:

τ_d = tiempo de retardo
T_i = temperatura del líquido inmediatamente después de la válvula de control
T_o = temperatura en el tanque
$a = m'/M$
m' = flujo de masa
M = masa de líquido que contiene el tanque.

La función de transferencia está dada por:

$$G_1(s) = \frac{T_o(s)}{T_i(s)} = \frac{e^{-\tau s}}{s/a + 1}$$

Considerando:

$a = 0.25$

$\tau = 0.4$ (s)

$T_{sample} = 0.2$ (s)

T_{sample} << constante de tiempo (4 s)
Límite = 20

La función de transferencia y su correspondiente función de transferencia discreta son:

$$G_1(s) = \frac{e^{-0.4s}}{4s + 1}$$

$$G_1(Z) = \frac{0.04877058\, Z^{-1}}{1 - 0.9512295\, Z^{-1}} * Z^{-2}$$

Para obtener los parámetros de los controladores, fueron utilizados: el método de ajuste de Zeigler-Nichols, Lugar Geométrico de las Raices y Respuesta de Frecuencia (diagrama de Bode). Los parámetros encontrados fueron los siguientes:

PI

Ganancia proporcional $K_p = 5$
Tiempo Integral $T_i = 4$

PID

Ganancia Proporcional $K_p = 2.5$
Tiempo Integral $T_i = 2$
Tiempo derivativo $T_d = 0.5$

ADELANTO-FASE

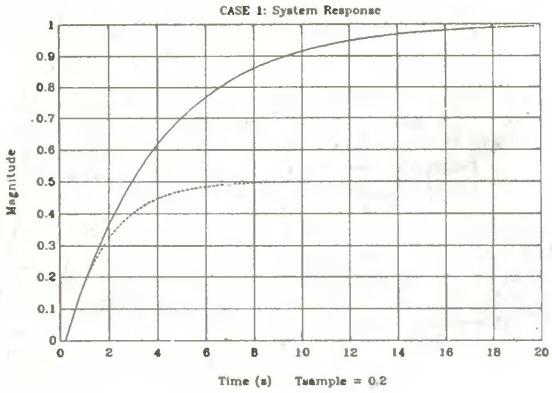
Polo = 1.35
Cero = 0.37

Estos parámetros fueron ingresados al sistema mediante la interface de usuario, se consideró una entrada paso de temperatura del líquido que ingresa al tanque T_i. La salida del sistema será la temperatura en el tanque T_o.

La Fig. 10.a. presenta la respuesta del sistema en lazo abierto y lazo cerrado,

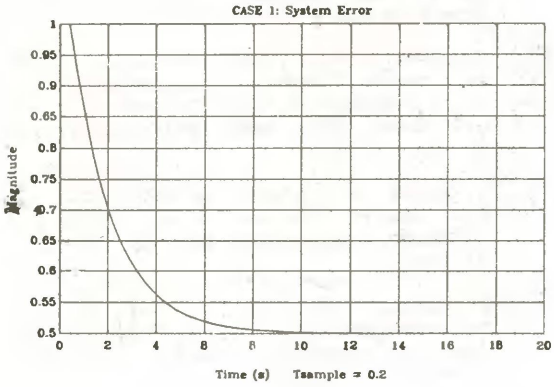
se observa que existe error en estado estable como lo indica la Fig. 10.b. La respuesta del sistema a cada controlador es presentada el la Fig. 10.c., y los errores correspondientes en la Fig. 10.d.

La salida del sistema utilizando el ***Sistema de Control Experto*** se muestra en la Fig. 10.e., donde la respuesta es

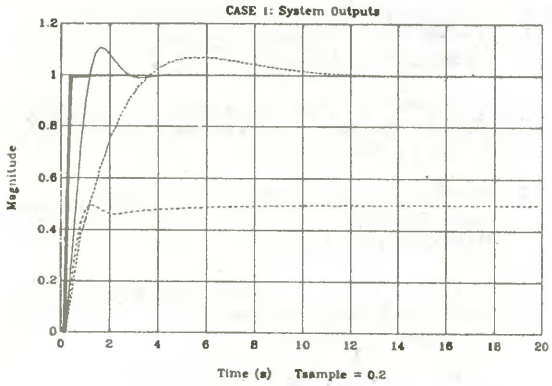


(a)

– Respuesta en lazo abierto
.. Respuesta en lazo cerrado

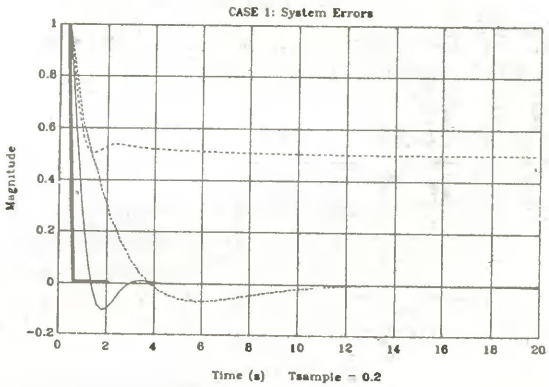


(b)



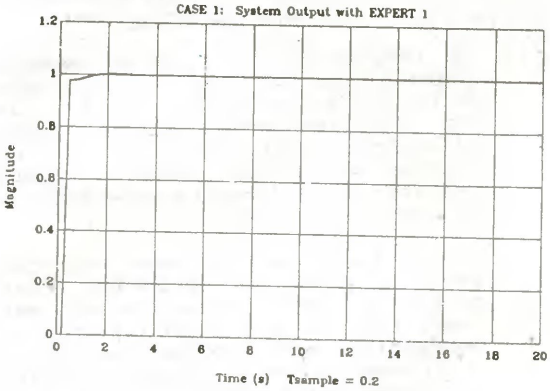
caracterizada por un tiempo de crecimiento pequeño debido a la acción del controlador deadbeat el cual es aplicado cuando el sistema sensa un cambio en la referencia, además se puede observar que casi no existe sobreimpulso. La Fig. 10.f. corresponde al error del sistema.

Es interesante analizar la salida del ***controlador experto*** que es una combinación de los algoritmos convencionales de control implementados. La señal de control más alta se obtiene al inicio de la simulación, ésta satura el actuador como resultado de usar un control deadbeat. La Fig. 10.g., presenta la señal de control que ha sido aplicada al proceso.

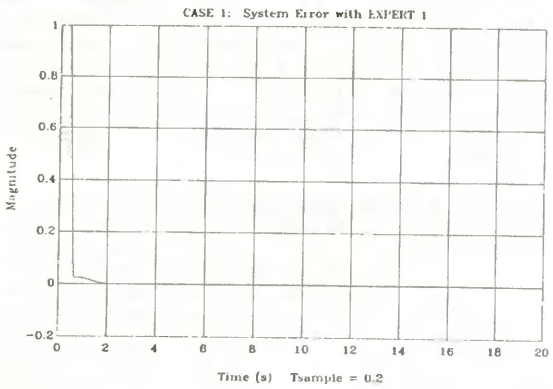


(d)

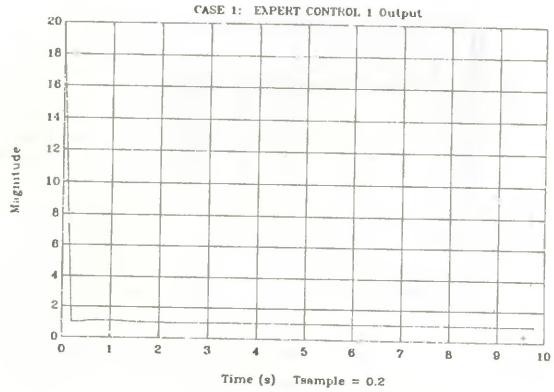
– PI
-- PID
-.- Adelanto-fase
▌ Deadbeat



(e)



(f)



(g)

Fig. 10: Resultados del Caso de Estudio.

5. CONCLUSIONES

Se ha investigado sobre las capacidades de un *Sistema de Control Experto Basado en Conocimiento* comparándolo con algoritmos de control convencional. Esta evaluación presenta las siguientes conclusiones:

(1) La respuesta del sistema experto generalmente fue más rápida y con menos sobreimpulso que la generada por controles convencionales. Esta diferencia ocurre debido a que el sistema de control experto intenta capturar las mejores características de cada controlador.

(2) En el diseño de sistemas expertos para control de procesos, dos problemas principales deden ser resueltos: Qué conocimiento es necesario y cómo puede ser adquirido y representado en un formato adecuado que pueda ser entendido y procesado por un programa computacional.

(3) El ***lenguaje C*** presenta buenas características para desarrollar sistemas expertos en tiempo real. Hay un sinnúmero de librerías que permiten manejar interfaces de entrada/salida, procesamiento paralelo y comunicaciones, lo que facilita y optimiza el trabajo del ingeniero.

(4) Un control experto combina características de adaptación, supervisión y monitoreo, capacidades necesarias para la nueva generación de *sistemas inteligentes* para control de procesos industriales.

(5) La complejidad de la base de conocimiento dependerá de la naturaleza y tipo del proceso, del número de controladores y de los requerimientos del sistema.

Finalmente, control experto y control clásico no deberían ser tratados como técnicas separadas, cada una tiene bondades y desventajas. Estas dos técnicas deberían ser utilizadas conjuntamente para obtener un *controlador verdaderamente robusto* y que satisfaga las necesidades del sistema.

6. REFERENCIAS

[1] Aström, K. J. and B. Witternmark (1984). *Computer Controlled Systems, Theory and Design*, pp. 174-196. Prentice-Hall, Englewood.

[2] Clarke, D. W. (1983). PID Algorithms and their Computer Implementation, *O.U.E.L. Report No. 1482/83*, University of Oxford, Department of Engineering Science.

[3] Arzen, K.-E. (1989). An Architecture for Expert System Based Feedback Control, *Automatica*, **25**, No. 6, pp. 813-827.

[4] Thompson, S. (1989). An Expert Adaptive PID Controller, *IFAC Symp. on Adaptive Control and Signal Processing*, **2**, 553-558, Glasgow.

[5] Isermann, R. (1981). *Digital Control Systems*, Springer Verlag, Berlin.

[6] Franklin, G. F. and Powell, J. D. (1980). *Digital Control of Dynamic Systems*, Addison-Wesley.

[7] Parsaye, K. and Chignell, M. (1988). *Expert Systems for Experts*, John Wiley & Sons, New York.

[8] Simons, G.L. (1987) *Exper Systems and Micros*. NCC Publications, Manchester, UK.

[9] Hu, D. (1987). *Programmer's Reference Guide to Expert Systems*, Howard W. Sams & Company, USA.

[10] Luger, G. F. and Stubblefield, W. A., (1989). *Artificial Intelligence and the Design of Expert Systems*, Benjamin/Cummings, USA.

[11] Efstathiou, J. (1986). Expert Systems, fuzzy logic and rule-based control explained at last. *Trans Ins M C*, **10**, No. 4, pp. 198-206.

[12] Aström, K. J., Toward Intelligent Control. *IEEE Control Systems Magazine*, April 1989, pp. 60-64.

[13] Bernard, J. A., Use of Rule-Based Systems for Process Control. *IEEE Control Systems Magazine*, October 1988, pp. 3-13.

[14] Patterson, D. W. (1990). *Introduction to Artificial Intelligence and Expert Systems*, Prentice-Hall, Englewood.

[15] Jackson, P. (1990), *Introduction to Expert Systems*, Addison-Wesley, 2nd Ed.

[16] Doraiswami, R. and Jiang, J. (1989). Performance Monitoring in Expert Control Systems. *Automatica*, **25**, No. 6, 799-811.

[17] Aström, K. J. and B. Witternmark (1989). *Adaptive Control*. Addison-Wesley, Reading. Massachusetts.

[18] Chantler, M. J. (1988). Real-time aspects of expert systems in process control. *Colloquium on Expert Systems in Process Control*, IEE, Savoy Place, London, U.K.

[19] Liu, K., Chizec, H. and Katona, P. (1987). A supervisory (expert) adaptive control scheme. *Proc. 10th World Congress of IFAC*, Munich, F.R.G.

[20] Trankle, T.L. and Markosian (1985). An expert system for control system design. *Proc. IEEE Conf. Control'85*, Cambridge, U.K., pp. 495-499.

[21] James, J.R., Frederick, D.K. and Taylor, J.H. (1985). The use of expert systems programming techniques for the desing of lead-lag precompensators. *Proc IEE Control*, Cambridge, 180-185.

[22] Mamdani, E. H. and Efstathiou, H. J. (1986). *Expert Systems and Optimisation Process Control*, Unicom series, Technical Press, Aldershot.

[23] Shirley, R. S. (1987). Some Lessons Learned Using Expert Systems for Process Control. *IEEE Control Systems Magazine*. **Vol. 7**, No. 6, pp. 11-14.

[24] Moore, R. L. (1986). Expert Systems in Process Control. *Proc. of Applications of AI in Engineering Problems*.

[25] Wrigth, M. L., Green, M. W., Fiegl, G. and Cross, P. F. (1986). An expert systems for real-time control. *IEEE Software*.

[26] Townsend, C. (1988). *Understanding C*. Howard W. Sams & Company. U.S.A.

[27] Feibel, W. (1989). *Using Quick C*. 2nd ed. Osborne McGraw-Hill. U.S.A.

[28] Clark, J. (1990). *Microsoft Quick C Programmer's Toolbox*. Microsoft Press. Redmond.

[29] Lee, Y. (1990). *Expert Switching Control System*. MSc. Dissertation. University of Bradford. England.

[30] Fierro, R. (1990). *An Expert System for Supervisory Process Control*. MSc. Thesis. University of Bradford. Control Engineering Department. England.

FIERRO BRITO RAFAEL.- Obtuvo el Título de Ingeniero en Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional en 1987. MSc. en Ingeniería de Control, Universidad de Bradford, Gran Bretaña en 1990. Curso sobre CIM (Manufactura Integrada por Computador), Centro de Investigaciones de la Renault, Paris, Francia y Universidad de Valladolid, España, 1991. Profesor Agregado a tiempo completo de la Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Electrónica y Control.