# CONTROL MULTIVARIABLE EN TIEMPO REAL

Ing. César A. Sarmiento Bravo

Ingeniero en Electrónica y Control, F.P.N., 1991

Escuela Poltitécnica Nacional

### RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es ensayar algunas estrategias de control multivariable tanto a nivel de simulación. como en tiempo real; estas son: P.I.D. multilazo, desacoplamiento y regulador cuadrático lineal.

La simulación se realizó en lenguaje de programación Quick Basic, versión 4.5 y para la aplicación en tiempo real, se utilizó el equipo de adquisición de datos y control Keithley 500A con su software respectivo Quick 500 que permite realizar aplicaciones del tipo indicado.

### **ABSTRACT**

The objetive of this work is use some strategies of multivariable control, or simulation lever and on real time; this strategies are: multiloop P.I.D., decoupling and linear quadratic regulator.

The simulation was done on Quick Basic language, version 4.5 and the application on real time was done using the adquisition and control equipment Keithley 500A, which allows this applications.

### 1.- INTRODUCCION

Considerando el creciente avance del control moderno en general y del control digital en particular, se nace necesario desarrollar en nuestro medio diversos algoritmos de control para su aplicación en casos reales, de tal modo que se puedan ensayar diversas estrategias tendientes a implementarse en forma práctica mediante el desarrollo de rutinas en tiempo real.

El presente trabajo tiene por objeto utilizar diversos algoritmos de control, los mismos que serán implementados en tiempo real y aplicables para sistemas multivariables; dichos algoritmos serán implementados en forma discreta realizándose asi un control de indole digital.

Cabe indicar que un sistema multivariable es aquel que dispone de múltiples entradas y múltiples salidas con interacción. Existe una gran variedad de algoritmos tendientes a controlar este tipo de sistemas; se ha tomado para desarrollar en el presente trabajo los siguientes: P.I.D. multilazo, desacoplamiento y regulador cuadrático lineal.

El software desarrollado posee dos módulos perfectamente diferenciados, el primer módulo tiene que ver con la parte correspondiente a simulación; mientras que el segundo módulo tiene por objeto la implementación de técnicas de control en

Ing. Patricio Burbano Romero

MSc. Systems and Control U.M.I.S.T. Inglaterra, 1984

Escuela Politécnica Nacional

tiempo real.

En lo referente a simulación se enfatiza en la presentación gráfica de resultados a fin de poder observar el comportamiento de las diversas plantas sobre las cuales se trabajará; en lo correspondiente a tiempo real se realiza un programa base con el cual se ensayan las estrategias de control simuladas previamente en el módulo respectivo, para su aplicación directa en sistemas físicos multivariables.

Se debe indicar que el programa se ha desarrollado en un computador IBM PS modelo 60 con monitor a color y utilizando el programa Quick Basic, versión 4.5; una vez realizado el software correspondiente a simulación, se aplican las técnicas ensayadas a control en tiempo real, mediante los resultados provenientes de la simulación y con la utilización del equipo de adquisición de datos y control KEITHLEY 500A y la ayuda del paquete de software QUICK 500 que permite el enlace entre el equipo mencionado y el computador bajo el esquema indicado en la figura 1: esquema de control en tiempo real.

Por otro lado cabe mencionar que los cálculos realizados se los ejecuta en forma off-line en la simulación, mientras que el control en sistemas físicos ya se lo implementa en forma on-line, es decir que el computador forma parte del lazo de control, en un esquema de control digital directo (DDC).

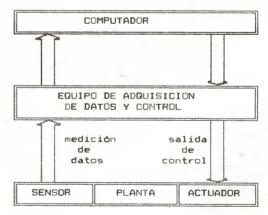


Fig. 1 .- Esquema de control en tiempo real.

# 2.-CONTROL P.I.D. MULTILAZO

Una de las diversas técnicas existentes en la teoria de control constituye el control multilezo, el mismo que consiste en considerar una planta con el mismo número de entradas y salidas de tal forma que se asume que cada salida es independientemente controlada por la entrada correspondiente; lógicamente, esta consideración es una aproximación que permite obtener buenos resultados si el sistema tiene un débil accolamiento o interacción; en tal caso se supone la existencia de lazos independientes.

la figura 2, control multilazo de un sistema multivariable, da una idea clara de los fines que se persiguen. En este caso se puede considerar a la planta con varias salidas yi. Yz, yz y varias entradas ui, uz, uz de tal forma que despreciando las interacciones (en el caso que sean débiles) se puede considerar varios lazos independientes. Cada uno de estos lazos

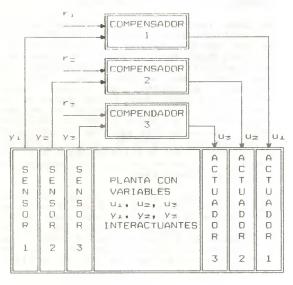


Fig. 2 Control multilazo de un sistema multivariable

deben ser controlados, por lo que se puede ensayar una diversidad de compensadores que tienen por objeto obtener la respuesta deseada de acuerdo a diversos requerimientos. Se ha optado ensayar en cada uno de estos casos un control proporcional-integral-derivativo (P.I.D.), el mismo que será implementado en tiempo real mediante una previa discretización.

Un control tipo P.I.D. se lo tiene bajo el esquema de control que se presenta en la figura 3, control tipo P.I.D. con sus diferentes variables.

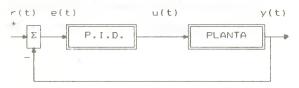


Fig. 3 Control tipo P.I.D.

Siendo el error del sistema la diferencia entre la referencia y la malida del mismo, el contrel propor ideal-integral-derivativo actua sobre el error, entregando el control u(t) que actuara sobre el sistema en cuestión, lo indicado se puede relacionar de la siguiente forma:

$$i_1(t) + *_{-}*e(t) + r_1* \int_{0}^{t} e(t)*dt + K_0*de(t)/dt$$
[2.1]

Pealizando el proceso de discretización, pues se tiene como obietivo realizar un control de tipo discreto, se tiene los siguientes resultados:

$$u[kT]=u[(k-1)T]+b_{\varpi}*e[kT]+b_{\bot}*e[(k-1)T] + b_{\Xi}*e[(k-2)T]$$

[2.2

Donde: T = Periodo de muestreo  $b_0 = K_B + K_x*T/2 + K_B/T$   $b_1 = K_x*T/2 - K_B - 2*K_B/T$  $b_2 = K_B/T$ 

En los párrafos precedentes se han desarrollado las expresiones matemáticas del compensador P.I.D. para sistemas univariables, por lo que debe resaltarse que para el caso multivariable puede ser aplicado este método de control en forma multilazo toda vez que el sistema tenga una débil interacción entre las entradas y las salidas; por otro lado cabe recalcar que al variar una referencia se tiene variaciones en todas las salidas.

Si en algún proceso se tiene lazos de control independientes univariables, es control independientes univariables, es control existen diferentes salidas sin acoplamiento o interacción, el caso por ejemplo de diferentes variables que corresponden a sistemas independientes, para este caso se aplica el control multilazo de dichos sistemas independientes con toda propiedad, esto es, sin ninguna aproximación.

# 3.- DESACOPLAMJENTO

En forma general se tiene que un cambio de una entrada en un proceso multivariable, produce cambios en todas las salidas del proceso; lo que en muchos casos dificulta la aplicación de diversos tipos de control. En base a esta consideración, sería deseable que en un sistema, la variación de una señal de entrada determine un cambio únicamente en una salida, sin que las restantes salidas se vean afectadas; esto es lo que se conoce con el nombre de desacoplamiento y se desarrollará en los párrafos siguientes.

Primeramente debe indicarse que para que un sistema pueda ser desacoplado se requiere indispensablemente que el número de entradas sea igual al número de salidas; si no se cumple esta condición, el sistema no podrá ser desacoplado.

Existen diversas técnicas de desacoplamiento, entre estas, tres son las más utilizadas en el campo del control moderno; estas son:

- Desacoplamiento mediante matriz función de transferencia.
- Desacoplamiento mediante realimentación de estado.
- Desacoplamiento mediante realimentación de salida.

La primera técnica presenta gran dificultad en la implementación computacional; por otro lado, para diseño de sistemas, el desacoplamiento por realimentación de es m**á**s aconsejable que e1 desacoplamiento por realimentación de salida, ya que por medio del primero se conseguir simultaneamente el desacoplamiento y estabilidad del sistema, mientras que con realimentación de salida se necesita prácticamente un precompensador para estabilizar dicho sistema.

El esquema de un sistema representado mediante variables de estado, se expresa de la siguiente manera:

$$\dot{x} = A x + B u$$
  
y = C x + D u [3.1]

Donde:

x =vector de estado (n x 1)

y = vector de salida (m × 1)

u = vector de entrada (m x 1)

A = matriz que define el sistema (n x n)

B = matriz que define el sistema (n x m)

C = matriz que define el sistema (m x n) D = matriz que define el sistema (m x m)

n = número de variables de estado

m = número de entradas= número de salidas

En el desarrollo posterior que se presenta se considerará que la matriz D=0 lo cual se satisface en sistemas reales.

En la técnica de desacoplamiento por realimentación de estado se tiene que la ley de control u se obtiene de la siguiente manera:

$$u = E r + F x \qquad [3.2]$$

Donde:

r = vector de control (m x 1)

E = matriz de precompensación (m x m)

F = matriz de realimentación (m x n)

El esquema de realimentación de estado para desacoplamiento se muestra en la figura 4.

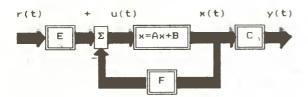


Fig. 4 Desacoplamiento por realimentación de estado

Mediante la realimentación expuesta se expresa el sistema en lazo cerrado de la siguiente manera:

$$\dot{x} = (A + BF) \times + BEr$$
 [3.3]  
y = C x

Luego, si se obtiene la correspondiente matriz función de transferencia de lazo cerrado se llega al siguiente resultado:

$$H(s) = C (sI - A - BF)^{-1}BE$$
[3.4]

Entonces, para tener un sistema desacoplado, se requiere que la matriz función de transferencia de lazo cerrado H(s) sea diagonal y no singular (invertible); es por esto que la presente técnica de desacoplamiento tiene por objeto encontrar un par de matrices constantes F y E que permitan que se cumpla lo requerido para H(s).

En el desarrollo teórico de desacoplamiento por realimentación de estado, se recurre a la siguiente consideración: sean d<sub>1</sub>,d<sub>2</sub>,.....,d<sub>m</sub> los enteros dados por:

$$d_s = min\{k: C_s \land B \neq \emptyset\}$$
 para  $k=\emptyset,1,\ldots,(n-1)$ 

$$d_{\mathfrak{s}} = (n-1) \text{ si } C_{\mathfrak{s}} A^{k} B = \emptyset \text{ para todo}$$

$$k \in [\emptyset, (n-1)]$$
[3.5]

Donde: C: = i-esima fila de la matriz C

Por lo tanto, un sistema multivariable puede ser desacoplado mediante realimentación de estado si y solamente si la matriz B\* de orden m x m es no singular; esta matriz se encuentra definida de la siguiente manera:

Haciendo referencia a la matriz B\* debe indicarse lo siguiente; siendo G(s) la matriz función de transferencia del sistema original; si det G(s) = Ø, implica que det B\* = Ø, por lo que el sistema con det G(s) = Ø es funcionalmente incontrolable y ninguna ley de control puede efectivamente desacoplar el sistema. Se dice que estos sistemas tienen un fuerte acoplamiento inherente.

Si det  $G(s) \neq \emptyset$ , y det  $B^* \neq \emptyset$ , el sistema tiene un acoplamiento no inherente; pero si det  $G(s) \neq \emptyset$  y det  $B^* = \emptyset$ , se dice que el sistema tiene un débil acoplamiento inherente. Un sistema con débil acoplamiento inherente no puede ser desacoplado mediante realimentación de estado, pero es posible determinar un precompensador dinámico y obtener un nuevo sistema con acoplamiento no inherente.

En base a las consideraciones anteriores se tiene como resultado las matrices F y E que desacoplan el sistema, de la siguiente manera:

$$E = (B^*)^{-1}$$
  
 $F = -(B^*)^{-1}A^*$  [3.7]

Donde:

Ahora bién, el par indicado siempre desacoplará el sistema si det B\* ‡ 0, pero puede producir inestabilidad o mala configuración de polos al presentarse modos inobservables. En tal caso, la matriz de realimentación puede ser definida por F' de tal forma que:

$$F + F + F_{-}$$
 [3.9]

Producierdo un set de polos deseados de lazo cerrado; con lo que el par (F .E) pertenece al conjunto de todos los pares (F.E) que desacoplan el sistema.

La matriz F<sub>o</sub> puede ser encontrada de la siguiente manera:

$$F_{\infty} = (B^*)^{-1} \sum_{s=0}^{d} M_s C A^s$$
 [3.10]

Entonces de esta manera se asignan los polos de lazo cerrado del nuevo sistema mientras simultaneamente se desacopla el sistema. De esta manera m + 🛵 di polos de lazo cerrado pueden ser modificados si se reasignan los valores de las matrices M..

Es asi como se obtiene ya un proceso desacoplado, en que la variación de una entrada influye únicamente en una salida sin que las otras sean afectadas; pero adicionalmente es conveniente realizar un control que nos permita llevar la variable de salida a valores y especificaciones deseadas: es por eso que en forma adicional en el presente trabajo se recurre a la utilización de compensadores tipo P.I.D. en forma multilazo, y aqui si se tiene un verdadero control multilazo en el que se encuentran eliminadas las interacciones entre múltiples entradas y múltiples salidas.

En términos generales, la técnica de control con desacoplamiento es de relativa importancia, puesto que permite diseñar compensadores en forma univariable de acuerdo a los diversos métodos de diseño que se tienen en el control clásico.

# 4.- REGULADOR CUADRATICO LINEAL

La teoría de control moderno, con la ayuda del computador y métodos digitales permite la realización de un sistema de funcionamiento óptimo de acuerdo a las especificaciones del criterio de funcionamiento utilizado, de tal forma que este se maximice o minimice.

Un indice de funcionamiento o función de costo es un valor escalar que pondera los valores importantes del proceso; dicho indice debe ser maximizado o minimizado de acuerdo a los fines que se persiguen, para de esta manera optimizar el proceso. En principio, los indices de funcionamiento determinan un funcionamiento óptimo basados en la optimización de parámetros, esto es que los valores de la planta son fijados de tal forma que satisfaga el indice de funcionamiento.

variables del sistema pueden tener limitaciones en cuanto a sus valores máximos o minimos, como en el caso de la ley de control u. Ante la dificultad de limitar estas variables en los parámetros de optimización, es necesario desarrollar otros métodos de optimización de lo cual se encarga el control moderno, definiéndose en este caso el indice de funcionamiento en término de los vectores de estado y de ontrol x(t) y u(t) respectivemente, y las limitaciones de las variables se encuentran

dadas en los pesos que se asignan a cada una de ellas.

En el presente trabajo, en lo referente a control óptimo, se desarrolla un tipo de realimentación óptima de estado, regulador cuadrático lineal, en que se tiene por objeto bajo ciertas condiciones determinar la ley de control óptima u°(x,t) que constituye la entrada del sistema y la cual puede transferir el sistema desde un estado inicial a un estado final, mientras existe indice una minimización del funcionamiento.

El regulador cuadrático lineal, como su nombre lo indica es un problema de regulación en que se asume cero a la entrada del sistema y se obtiene la respuesta del mismo a partir de una condición inicial [x(t<sub>4</sub>)]. En este condición inicial  $[x(t_1)]$ . En este regulador bajo un criterio óptimo se realiza realimentación de estado, bajo el esquema de la figura 5, realimentación óptima de estado.

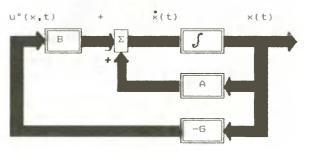


Fig. 5 Realimentación óptima de estado

La representación del sistema original en variables de estado es la siguiente:

$$\overset{\bullet}{\times}(t) = A \times (t) + B u(t)$$
 [4.1]

x = vector continuo de estado

u = vector continuo de control

A = matriz que define el sistema B = matriz que define el sistema

Luego, se desea desarrollar un algoritmo que permita encontrar la ley de control óptima que será applicada al sistema; el algoritmo indicado se lo realiza desde un punto de vista discreto por lo que se procede a la discretización del sistema representado en la ecuación 4.1; así se tiene:

$$\times [(k+1)T] = \phi(T) \times [kT] + \Theta(T) \cup [kT]$$
[4.2]

Donde:

$$\Phi(T) = \int_{0}^{T} e^{A(T-\tau)} B d\tau$$

Para sistemas físicos, la entrada de control es siempre limitada. Por ejemplo, la amplitud de cada componente del vector de control puede ser limitada tal como:  $|u_{\pm}(kT)| \le U_{\pm}$ ; donde  $U_{\pm}$  es una constante, y el subindice i representa la i-ésima componente del vector.

Para el caso en que se desea limitar la energía del control se tiene: u₁²(kT)≤Mi; donde cada M<sub>x</sub> es una constante. La disponibilidad de una energía finita en el control puede ser representada mediante la

siguiente función de costo: u'(kT) R u(kT) donde R es una matriz de ponderación; esta función es llamada una forma cuadrática. En muchos casos el control debe ser limitado. v si satisface dicha condición es llamado control admiscible.

De esta forma se trata de encontrar la ley de control óptima u°(kT) para k=0,1,2,...,N-1 mediante el siguiente indice de funcionamiento cuadrático:

$$J_{N} = \frac{1}{2} [x'(NT)Sx(NT)] + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} [x'(kT)Qx(kT) + 2x'(kT)Mu(kT) + u'(kT)Ru(kT)]$$

$$[4.3]$$

#### Donde:

S = matriz simétrica semidefinida positiva Q = matriz simétrica semidefinida positiva R = matriz simétrica definida positiva

M = matriz de ponderación estado-control

Nota: El apóstrofe (') indica la transpuesta de la matriz indicada.

Ahora, el problema consiste en encontrar la ley de control óptima que minimice el indice de funcionamiento cuadrático de la ecuación 4.3. Si se continúa con el proceso deductivo de minimización se llega a la llamada ecuación de Riccati que se presenta a continuación:

$$\begin{split} \mathsf{K}(\mathtt{i}) \; &= \; \mathsf{Q} \; + \; \underline{\Phi}' \mathsf{K}(\mathtt{i} + 1) \underline{\Phi} \; - \; [\mathsf{M}' \; + \; \underline{\Theta}' \mathsf{K}(\mathtt{i} + 1) \underline{\Phi}]' \\ &= \; [\mathsf{R} \; + \; \underline{\Phi}' \mathsf{K}(\mathtt{i} + 1) \underline{\Phi}]^{-1} \; [\mathsf{M}' \; + \; \underline{\Theta}' \mathsf{K}(\mathtt{i} + 1) \underline{\Phi}] \end{split}$$

14.41 Donde K(i) se conoce como la ganancia de Riccati.

Con lo que se obtiene la siguiente ley óptima de control:

$$u^{\bullet}(i) = -[R + \Theta'K(i+1)\Theta]^{-1} [M'+\Theta'K(i+1)\Phi]$$

$$\times^{\bullet}(i)$$

r4.51 Lo cual puede ser descrito de la siguiente manera:

 $u^{\circ}(i) = -G(i) \times^{\circ}(i)$ 

Donde:

$$G(i) = [R + \Theta'K(i+1)\Theta]^{-1}[M'+\Theta'K(i+1)\Phi]$$

$$[4.7]$$
(i) or la constitute de realization

G(i) es la ganancia de realimentación óptima de estado.

Con lo que la ecuación 4.4º podría expresarse de la siguiente manera:

$$K(i) = Q + \Phi'K(i+1)\Phi - [M'+\Theta'K(i+1)\Phi]'G(i)$$
[4.8]

Las ecuaciones 4.7 y 4.8 se resuelven en forma iterativa con una condición inicial K(N)=S y en recursión de adelante hacia atrás. Un vez resueltas dichas ecuaciones se toma el valor estable de la solución G(0) que constituiría la ganancia óptima de realimentación de estado.

# 5.- RESULTADOS

En las pruebas realizadas tanto a nivel de simulación como en tiempo real se trabajado con un sistema de segundo orden con dos entradas y dos salidas de tal modo de disponer de un sistema multivariable.

presenta continuación se representación en variables de estado del sistema en mención:

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} -0.11 & 0.01 \\ 0.01 & -0.076667 \end{bmatrix}$$

La representación del mismo sistema términos de Laplace se tiene de siquiente manera:

$$Y_{1}(s)$$
 = 1  $D_{11}$   $D_{12}$   $D_{1}(s)$   $D_{2}(s)$ 

Donde:

$$\Gamma = (s + 0.0739)(s + 0.1128)$$

$$b_{11} = \emptyset.1(s + \emptyset.076667)$$

$$b_{12} = 0.0006667$$

$$b_{21} = 0.001$$

$$b_{22} = 0.066667(s + 0.11)$$

Considerando además que se tiene constante de tiempo mínima de 8.87 segundos, se utilizará un periodo de muestreo aproximadamente diez veces menor, por lo que se ha elegido un periodo de muestreo adecuado de 0.9 segundos.

# 5.1.- RESULTADOS DE SIMULACION

En base al sistema previamente indicado se ha procedido primeramente a la simulación mediante la técnica P.I.D. multilazo para sistemas multivariables de tal forma que se ha despreciado la interacción considerándose una ganancia integral que asegure la no presencia de error en estado estable, pero que tampoco lleve el control a la saturación, una ganancia proporcional relativamente alta para una respuesta rápida y una no muy significativa ganancia derivativa.

Como se esperaba se pudo apreciar de las pruebas realizadas que una variación en una de las entradas del sistema multivariable en cuestión afecta sobre la respuesta transitoria de la segunda salida, puesto que no se ha desacoplado el sistema; sin embargo los resultados obtenidos son enteramente satisfactorios toda vez que el sistema mencionado posee un débil acoplamiento.

Posteriormente se ha realizado el desacoplamiento del sistema comprobándose que la variación de un entrada no afecta mas que a la salida correspondiente y no a la otra salida. Sin embargo se ha podido observar que la salida difiere en alto grado de la referencia del nuevo sistema, por lo que se bara por lo que se hace necesario la compensación del sistema ya desacoplado

para lo cual se ha utilizado un compensador tipo P.I.D. y , con las referencias de 1 y 2 para las salidas 1 y 2 respectivamente se pueden visualizar los resultados mediante el gráfico realizado en LOTUS con el archivo de datos generado en el software desarrollado; el gráfico en mención se presenta en la figura 5.1.

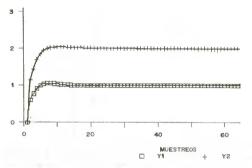


Fig. 5.1 Salidas en desacoplamiento (sistema compensado)

Del análisis de los resultados de desacoplamiento así como del propio uso del programa y su visualización completa en pantalla con una gran cantidad de opciones que permiten probar el sistema bajo diversas condiciones, se pudo apreciar que la variación de una entrada solo afecta a la salida correspondiente, es decir que el desacoplamiento da efectivamente como resultado subsistemas univariables.

Por otro lado se ha probado además que la variación de los parámetros de un compensador no afecta la salida no correspondiente, afianzándose aun más el criterio de desacoplamiento.

Finalmente en lo que a simulación se refiere, se realizaron pruebas mediante la técnica de regulador cuadrático líneal; dichas pruebas fueron ejecutadas con variaciones de las diversas matrices de ponderación.

Cabe recalcar que los valores de salida en este regulador parten de una condición inicial para llegar a tomar el valor final de cero; sin embargo al algoritmo utilizado se le ha incluido valores de offset de tal manera que el valor final de los estado sea distinto de cero y mediante una adecuada selección de dichos valores se pueda tener un valor deseado de la salida diferente de cero. Es importante mencionar que de esta manera no se tiene un verdadero control óptimo y mas bién se puede hablar de un control sub-óptimo que según las pruebas realizadas proporciona muy huenos resultados.

En la figura 5.2 se presenta uno de los gráficos obtenidos mediante la técnica mencionada.

En cuanto a simulación se refiere se debe indicar que los resultados obtenidos como la obtención del modelo del sistema ha sido contrastado con el paquete de programación CC, el mismo que constituye un paquete especializado de sistemas de control y del cual se ha explorado una pequeña parte y en los puntos de interés.

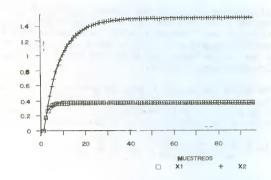


Fig. 5.2 Salidas en regulador cuadrático lineal (mayor peso a los estados)

# 5.2.- RESULTADOS DE TIEMPO REAL

Para la realización de las pruebas en tiempo real se utilizó el sistema físico planteado en simulación, mediante el equipo de adquisición de datos y control KEITHLEY 500A y el software respectivo para el manejo de dicho equipo GUICK 500.

Para el ingreso de los parámetros necesarios para las diversas técnicas de control se ha tomado como base los resultados provenientes de la simulación, obteniéndose de este modo en forma general resultados satisfactorios.

Es importante mencionar que los gráficos que se presentan en este numeral han sido obtenidos de la implementación de los diversos algoritmos en el sistema físico y en dichos gráficos se tiene una escala vertical de 1 voltio por división, mientras que la escala horizontal es de seis segundos por división.

Primeramente en la figura 5.3 se presenta los gráficos de las salidas del sistema en la implementación del control P.I.D. multilazo con los valores de los parámetros de los compensadores obtenidos previamente en simulación; en este caso se ha utilizado como referencia los valores de 1 y 2 voltios respectivamente.

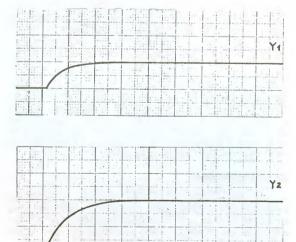


Fig. 5.3 Salidas del sistema .- P.I.D. multilazo

Adicionalmente se ha realizado cambios en una referencia y perturbaciones en una de las salidas, observándose que la otra salida se encuentra afectada.

Posteriormente se realizaron pruebas en cuanto a <u>desacoplamiento</u> obteniéndose los resultados de la figura 5.4 en que se observa las salidas del sistema desacoplado y compensado con referencias de 5 y 2 voltios.

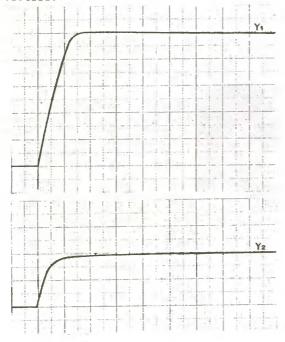


Fig. 5.4 Salidas del sistema desacoplado y compensado

Adicionalmente se han realizado pruebas que determinan que la variación en una referencia del sistema no afecta la salida no correspondiente del sistema desacoplado; por otro lado, se ha perturbado fuertemente la salida  $y_{\perp}$  observándose que la salida  $y_{\perp}$  prácticamente no se encuentra afectada; lo indicado se muestra en la figura 5.5.

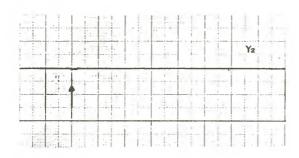


Fig. 5.5 Salida  $y_2$  .- respuesta ante perturbación en salida  $y_1$ 

De este modo se puede afianzar el conocimiento de la técnica de desacoplamiento, pues se observa la existencia de dos subsistemas independientes, ya que la variación de una referencia, el cambio de los parámetros de un compensador y una perturbación fuerte no

afecta a la salida no correspondiente.

Finalmente se realizaron pruebas en cuanto a regulador cuadrático lineal. En la figura 5.6 se presentan las salidas del sistema con la matriz de realimentación de estado obtenida en simulación, con un alto peso a los estados y bajo peso al control y con la utilización de 2 y 3 voltios como valores de offset.

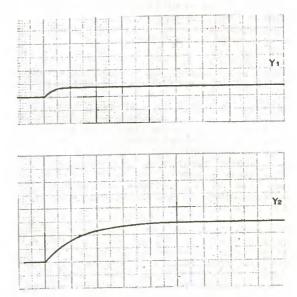


Fig. 5.6 Salidas del sistema regulado .regulador cuadrático lineal

Las salidas del sistema regulado mostradas en la figura 5.6 han sido obtenidas mediante los controles u, y u, que se muestran en la figura 5.7

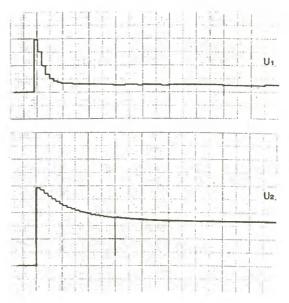


Fig. 5.7 Controles del sistema regulado .regulador cuadrático lineal

Se debe indicar adicionalmente que al realizar una fuerte perturbación en la salida  $y_1$ , la salida  $y_2$  no ha sido afectada, demostrandose que se dispone de un buen regulador.

Es conveniente mencionar que en el trabajo realizado, se ejecutaron una serie de pruebas, de las cuales se han presentado aquí las más representativas.

#### 6.- CONCLUSIONES

Se ha podido comprobar que los resultados de la simulación han sido utilizados en forma eficiente en lo que ha tiempo real se refiere y los resultados obtenidos tanto a nivel de simulación como en la implementación en tiempo real son enteramente satisfactorios.

La técnica multivariable de P.I.D. multilazo presenta muy buenos resultados si el sistema posee débil acoplamiento; de no ser así, será necesario desacoplar el sistema a fin de obtener subsistemas univariables que pueden ser controlados fácilmente mediante cualquiera de las técnicas de control clásico. En cuanto a la técnica de regulador cuadrático lineal da muj buenos resultados de regulación y se debe tener presente los requerimientos que se desea en el sistema para seleccionar adecuadamente el valor de las matrices de ponderación.

Una vez que se ha realizado control multivariable en tiempo real en base a los algoritmos implementados en el presente trabajo, resultaria interesante desarrollar nuevos algoritmos de indoles multivariable con el propósito de ser implementados en sistemas físicos reales, los mismos que podrían tener una utilidad de tipo industrial.

Entre otros algoritmos se podría pensar en realizar por ejemplo desacoplamiento por realimentación de salida, observador óptimo de Kalman, técnicas en el dominio de la frecuencia, etc.

### REFERENCIAS

- KUO, BENJAMIN, "Digital Control Systems",
   Holt-Saunders International, 1981.
- KUO, BENJAMIN, "Discrete-Data Control Systems", Prentice Hall International.1970.
- OGATA, KATSUHIKO, "Ingeniería de Control Moderna", Prentice Hall International, 1973.
- MUNRO N., "Multivariable Control Theory 3.- Decoupling Theory", University of Manchester Science and Theonology, 1976.
- MUNRO N., "Multivariable Control Theory 3.- Non-Interacting Control", Universyti of Manchester Institute of Science and Thecnology, 1974.
- -- MUNRO, N., "Modern Approaches to Control Systems Desing", Peter Peregrinus Ltd.,1979.
- KETHLEY, "Quick 500 Data Adquisition and Control Software", 1988.
- MICROSOFT, "Microsoft Quick Basic", Microsoft Corporation, 1980.

#### BIOGRAFIAS

BURBANO, PATRICIO Nació en Guito. Se graduó de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en la E.P.N. en 1974.

Realizó sus estudios de Post-Grado en el U.M.I.S.T. en la universidad de Manchester en Inglaterra en 1984.

Actualmente es Profesor Principal de la Escuela Politécnica Nacional y es director del proyecto de investigación CONUEP-EPN 8701 "CONTROL DE PROCESOS EN TIEMPO REAL".



SARMIENTO BRAVO,CESAR Nació en Loja, el 26 de mayo de 1967. Obtuvo el titulo de bachiller en humanidades modernas en el Instituto Nacional Mejía en 1984

Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional obteniéndo el título de Ingeniero en Electrónica y Control en febrero de 1991. Actualmente presta sus servivios en la Escuela Politécnica Nacional.