

UNA PROPUESTA TAXONOMICA PARA LOS SISTEMAS DE CONTROL

HERNÁN ALVAREZ

Escuela de Química y Petróleos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

ROSA ELVIRA CORREA

Escuela de Mecatrónica, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

ROSALBA LAMANNA

Departamento de Procesos y Sistema, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

Recibido para revisión 21 de Noviembre de 2001, aceptado 6 de Mayo de 2002, versión final recibida 23 de Mayo de 2002

RESUMEN: En este trabajo se presenta una posible clasificación de los sistemas de control, tomando como criterio la utilización de la información disponible del proceso por parte del sistema de control. El objetivo es brindar una clasificación general y compacta, la cual permita incluir cualquier técnica de control nueva dentro de uno de los grupos propuestos. Tal clasificación posibilita además, la estructuración del estudio y aplicación de las diferentes técnicas de control a un sistema dinámico. Del mismo modo, genera una división de todas las estructuras de control posibles en tres grupos, con lo cual se pueden plantear diversas posibilidades en el desarrollo de nuevos algoritmos de control.

PALABRAS CLAVES: Sistemas de Control, Taxonomía, Información del proceso, Algoritmo de control.

ABSTRACT: In this work a proposal for classifying control systems is presented taken as classification criteria the use of process information in the system. The aim is to give a general and compact classification, which permits to include any new control technique inside one of the proposed groups. Such a classification allows structuring the study and application of different control techniques to dynamic systems. Additionally, a division among all the possible control structures into three groups is generated. This fact permits to propose several possibilities in the development of new control algorithms.

KEYWORDS: Control systems, Taxonomy, process information, control algorithms.

1 INTRODUCCION

La principal motivación para pensar una taxonomía de los sistemas de control es su posterior uso para estructurar un estudio detallado de las diversas técnicas propuestas para controlar un sistema dinámico. La clasificación propuesta busca cubrir todo el panorama de posibles sistemas de control, con el fin de que técnicas de control que aparezcan en el futuro, puedan también ser ubicadas sin ambigüedades dentro del

árbol taxonómico propuesto. Se busca una clasificación compacta y general que permita

un estudio más detallado y ordenado de los sistemas de control. Se brinda así una herramienta de soporte para la planificación de cursos en el área, que además, ofrece al interesado la visión de conjunto de los sistemas de control. Con el fin de fundamentar toda la discusión posterior, en este trabajo se presenta primero una descripción de términos relativos al proceso a controlar y al sistema de control. De este modo, resulta mucho más directa y

comprendible una taxonomía de los sistemas de control, clasificados en un primer nivel, de acuerdo con el uso que hacen de la información disponible (a través de sensores o estimadores) sobre el proceso.

Es bien sabido que cualquier estructura de control aplicable a un sistema dinámico, debe contar con información suficiente sobre el sistema, con el fin de plantear y aplicar una estrategia de control. La disponibilidad de información sobre el sistema varía considerablemente de acuerdo con el número y tipo de sensores existentes, asumiendo que se seleccionaron para cumplir con un grado de observabilidad que permita formular una estructura de control adecuada para el sistema (Kuo, 1984, Astrom and Hagglund, 1998). La información con la que puede operar una estructura de control se divide en tres niveles: información necesaria (nivel básico), información suficiente (nivel completo) e información redundante (nivel óptimo). Aunque en cada nivel es posible la operación exitosa de diversas estructuras, tal disponibilidad de información marca distinciones fundamentales en los algoritmos de control. Es precisamente en tales diferencias en las que se fundamenta la taxonomía aquí propuesta.

En este trabajo, se presenta en la parte 2 una discusión breve sobre conceptos fundamentales para entender la taxonomía propuesta. En la parte 3, se discute el criterio general de la clasificación presentada, mientras que finalmente, en la parte 4, se detalla la clasificación en lo que tiene que ver con sus niveles interiores.

2 SISTEMA, PROCESO Y SISTEMA DE CONTROL

2.1 Definiciones generales

Lo primero que se debe apuntar en esta sección es que muchas veces los términos sistema y proceso se usan indiscriminadamente como referentes al mismo objeto. Aunque tal igualdad entre los términos no existe, la fuerza de la costumbre y el contexto mismo donde se usa el término, han hecho que no aparezca una confusión

significativa cuando los dos términos se conmutan. A pesar de esto, hagamos aquí una breve mención a la diferencia entre los dos vocablos (*Himmelblau and Bischoff, 1968*).

Sistema: Conjunto de reglas, principios, métodos, técnicas o cosas, ordenadas con arreglo a una ley y para una finalidad determinada.

Proceso: Grupo de operaciones o tratamientos de materia, energía o información con el fin de obtener un producto de características específicas.

Se evidencia de inmediato de estas dos definiciones el grado más abstracto de Sistema que de Proceso, no obstante compartir la misma definición básica: conjunto de elementos unidos por una ley para lograr un fin determinado. Ese grado de abstracción que entraña el concepto de sistema, permite que en un proceso se puedan definir múltiples sistemas tomando (de acuerdo a un propósito arbitraria) partes, equipos, elementos o incluso secciones de elementos dentro del proceso. Se verifica por lo tanto la similitud entre los conceptos Sistema y Proceso. Pero también queda claro que el concepto Sistema posee más nivel de abstracción que el concepto Proceso. Por eso, debería utilizarse la designación de sistema siempre que se analiza cualquier proceso, de modo que las divisiones que se tomen en las partes del proceso para su análisis no riñan con la división ingenieril de los elementos (por equipos) del proceso.

En un sentido amplio, los problemas de ingeniería pueden examinarse desde dos puntos de vista diferentes. El primero atiende a una visión fenomenológica. Por ejemplo, si el problema es el diseño de un reactor químico, lo deseable es realizar los siguientes estudios:

1. Mecanismos de reacción y comportamiento cinético de la reacción.
2. Propiedades de los productos y subproductos de la reacción.
3. El calor y la masa transferidos bajo las condiciones prevalecientes en el proceso.

4. Los posibles materiales de construcción del reactor.
5. Cualquier otro aspecto que pueda aislarse para su estudio.

Cada uno de estos procedimientos trata como influencias externas a todos los otros fenómenos, con el fin de focalizar toda la atención en el fenómeno que se estudia. De hecho la situación ideal en este caso es que cada fenómeno esté totalmente aislado de factores de perturbación externa.

El segundo punto de vista para el análisis de un problema de ingeniería propone el tratamiento del problema como un sistema. Retomando el ejemplo del diseño del reactor químico, en este caso el interés está en el estudio de las interacciones de las condiciones de reacción con la conversión, la separación de productos y subproductos, la controlabilidad del proceso, el diseño mecánico del equipo, etc. La situación ideal en este estudio es que los comportamientos de todos los componentes del sistema sean completamente conocidos, de modo que la atención pueda concentrarse en el comportamiento del proceso (sistema) como un todo. Como se evidencia, estos dos puntos de vista en el análisis de cualquier problema de ingeniería son complementarios (*Mah*, 1990).

De acuerdo con la segunda visión, en la Figura 1 se ve una representación típica de un sistema de medición integrado a un proceso. Aparecen allí las señales que permiten abordar el modelamiento y el control del proceso. El sistema primario es el proceso, mientras que el sistema de medición engloba al conjunto de instrumentos utilizados en el monitoreo de las variables. La nomenclatura usada denomina u al vector de entradas de control al proceso o variables manipuladas; d al vector de perturbación o entradas no controladas debidas a la incertidumbre en la dinámica del sistema; w al vector de ruido en los sensores o entradas no controladas debidas a la incertidumbre en las mediciones; x al vector que refleja los estados del sistema y y al vector de salidas.

De este modo, cualquier sistema puede representarse mediante dos formulaciones

vectoriales: Una ecuación de Estado, que resulta ser una ecuación diferencial:

$$\frac{dx}{dt} = f[x(t), u(t), d(t)] \quad (1)$$

función de los estados $x(t)$, las entradas $u(t)$ y las perturbaciones $d(t)$. Y una ecuación de Salida, que normalmente es una ecuación algebraica:

$$y(t) = g[x(t), u(t), d(t), w(t)] \quad (2)$$

función del estado $x(t)$, las entradas $u(t)$, las perturbaciones $d(t)$ y el ruido en el sensor $w(t)$.

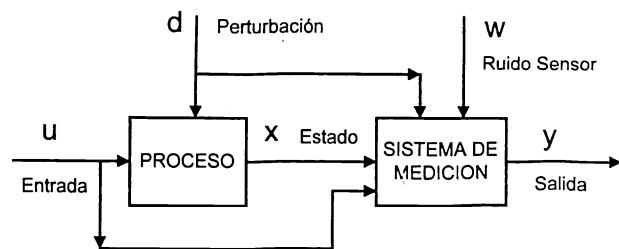


Figura 1. Sistema de medición integrado a un proceso.

Es precisamente desde este sistema con medición desde donde el ingeniero debe tomar la información para diseñar la estructura y el algoritmo del sistema de control. Eso genera muchas posibles configuraciones para el sistema de control, lo que hace necesaria una taxonomía de toda esa gama de posibilidades.

2.2 Sistema de Control y Posibles Clasificaciones

Como se sabe, un sistema de control no es más que una estructura externa que se adiciona a un proceso para permitir que una o varias de las salidas (o estados internos) de éste sigan una trayectoria de referencia o se mantengan en una determinada franja de valores. Para que este objetivo se cumpla deben existir varias condiciones (*Stephanopoulos*, 1984; *Bennetts*, 1994):

- 1 Que el acoplamiento entre sistema de control y proceso responda a una estrategia adecuada, es decir, que las tareas de toma de información y de acción sobre el proceso se ejecuten según una lógica apropiada para lograr el control (mecanismo de interacción).
- 2 Que el algoritmo de control utilice la mayor cantidad de información disponible *a-priori* desde la fenomenología del proceso o tomada desde el proceso mismo en puntos que brinden la información de mayor riqueza (cantidad y calidad) de información.
- 3 Que la información proveniente del proceso se manipule de manera adecuada para controlarlo (algoritmo de control).

Con relación a la primera condición (mecanismo de interacción), debe mencionarse que atiende directamente al diseño de la estructura del sistema de control. Particularmente esto se refiere al tipo de sistema de control, a la selección de variables influyentes y a la determinación de los elementos primarios (sensores) y los elementos finales de control (actuadores) más adecuados. En tanto que las restantes dos condiciones (utilización de información de proceso y algoritmo de procesamiento de dicha información) se relacionan directamente con el diseño del algoritmo de control. Particularmente, la segunda condición se refiere a la cantidad de información que se utiliza en el algoritmo de control, sin importar para nada el tipo de tratamiento y manipulación que se hace de esa información. Por su parte, la tercera condición se refiere a la forma en que la información se manipula, detallando los tipos de relaciones matemáticas, lógicas o simbólicas que se establecen en el algoritmo de control para las variables tomadas de proceso.

Desde una perspectiva general de los sistemas de control, parece obvio que la primera condición no resulta adecuada para clasificarlos, puesto que genera familias muy grandes de sistemas de control:

- 1 Control monovariable v.s. control multivariante

- 2 Control en lazo abierto v.s. control en lazo cerrado.
- 3 Control de lazo simple v.s. control de múltiples lazos.

En cambio, la segunda y la tercera condición permiten realizar varias clasificaciones. Como el objetivo es llegar a una taxonomía lo suficientemente general y compacta, se deben analizar las posibilidades de clasificación que cumplen con estos dos criterios.

A partir de la tercera condición (algoritmo de control) se derivan varias sub-clases de sistemas de control, que presentan un panorama muy disperso del área (*Baker and Farrel, 1992; Lin, 1994; Isidori, 1995; Smith and Corripio, 1997; Henson and Seborg, 1997*). Brevemente a continuación se mencionan algunas de estas sub-clases con el fin de mostrar que se logra un grado de generalidad muy bajo con una taxonomía basada en el tercer criterio:

- 1 Control lineal v.s. control no lineal.
- 2 Control fijo, control adaptable o control con aprendizaje.
- 3 Control determinístico, control estocástico o control de sistemas caóticos.
- 4 Control entrada-salida v.s. control en el espacio de estado.

A su vez, cada una de estas sub-clases puede dividirse de acuerdo con otras condiciones, lo que dispersa mucho más la taxonomía. Es por eso que en el presente trabajo se propone una taxonomía basada en la segunda condición (cantidad de información), la que como se verá, permite una clasificación más compacta y general.

3 CLASIFICACION DE ACUERDO CON LA CANTIDAD Y PROCEDENCIA DE LA INFORMACION

En lo fundamental, la cantidad y procedencia de la información (mediciones directas o

conocimiento previo) que se toma puede determinarse sin ambigüedades para cualquier estructura de control que se proponga. Esto permite aplicar la taxonomía aquí presentada a cualquier sistema de control, existente o que aparezca en el futuro como un sistema nuevo. Así, se pueden formar tres grupos de sistemas de control a saber: Los Prealimentados o anticipativos, los Retroalimentados o reactivos y los Combinados o predictivos. Esta resulta ser una clasificación de primer nivel, que de entrada discrimina los sistemas de control en sólo tres grandes grupos. Con esto se cumplen las condiciones de una clasificación general y compacta. Por lo tanto hace falta una clasificación más fina (en un segundo nivel), que genere subdivisiones en cada una de las familias de sistemas de control. Como ya se utilizó la segunda condición de los sistemas de control (cantidad de información), puede ahora recurrirse a la tercera condición (algoritmo de control) para generar subdivisiones. Se toma por lo tanto la

forma del algoritmo de control como criterio de clasificación de segundo nivel, actuando sobre cada una de las familias generadas en el primer nivel. Finalmente, se proponen dos niveles más de clasificación, basados en las particularidades de cada uno de los algoritmos de control, lo que permite acomodar cualquier técnica de control existente o que se desarrolle en el futuro.

En la Figura 2, se presenta la taxonomía propuesta en detalle de manera gráfica. A continuación se explican cada una de las clasificaciones de primer y segundo nivel, y se mencionan las clasificaciones de los niveles restantes. Debe recordarse que la taxonomía propuesta no es exhaustiva en nombres de técnicas de control particulares. Más bien está pensada como una estructura en la cual se pueden acomodar tales técnicas particulares bajo una denominación común a otras técnicas de control existentes.

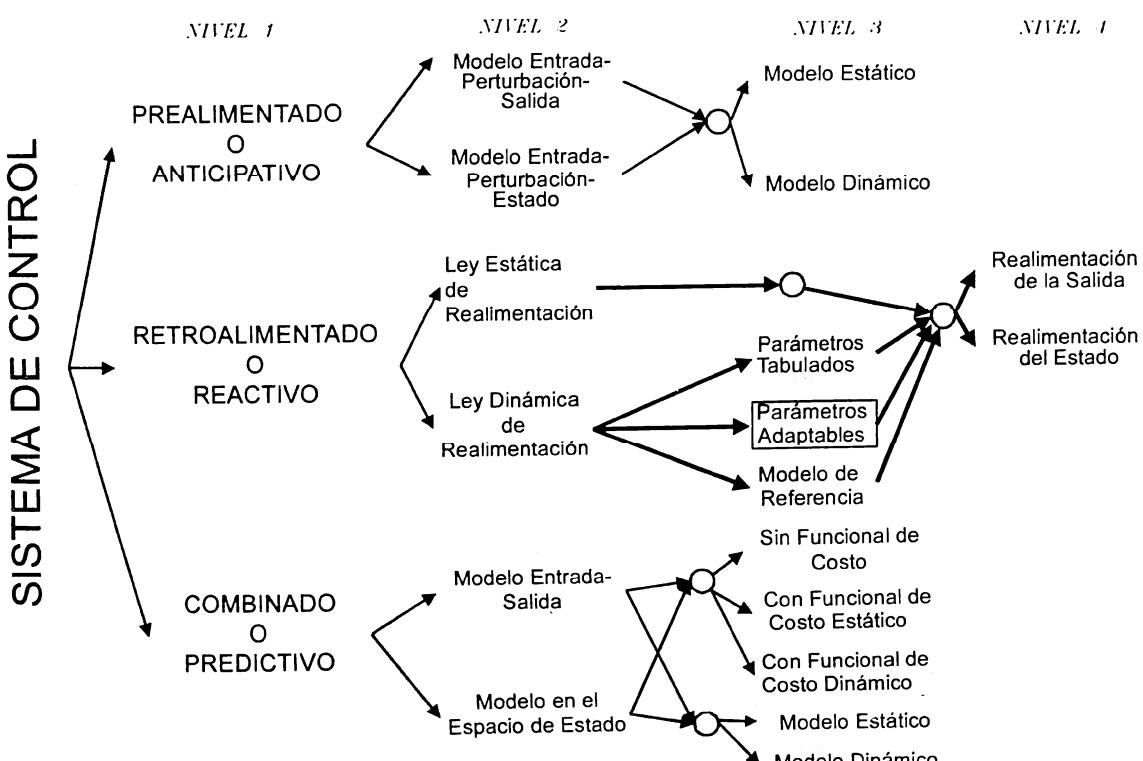


Figura 2. Representación gráfica de la taxonomía propuesta.

4 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA CLASIFICACIÓN

Con el fin de clarificar la propuesta taxonómica presentada, veamos una descripción detallada de los niveles uno y dos y una mención al tercer nivel de la clasificación propuesta. Vale la pena recordar que el primer nivel del árbol de clasificación atiende al criterio de la cantidad de información que se utiliza, mientras que en el segundo nivel, el criterio utilizado es la naturaleza del algoritmo de control. Para el tercer nivel se utilizó como criterio de clasificación una característica particular del algoritmo de control dentro de un mismo tipo de sistema de control en el segundo nivel. Se deja abierta la posibilidad de un cuarto nivel de clasificación de acuerdo con alguna otra característica del algoritmo de control que así lo permita, como se ilustra para los controladores retroalimentados.

4.1 Sistemas de Control Prealimentados o Anticipativos

En este tipo de sistemas de control, se considera que existe baja incertidumbre frente al comportamiento del proceso, por lo que puede asumirse que la acción de control es una función precalculada del valor deseado de la salida (o del estado):

$$u(t+\Delta t) = f[y(t)_{DESEADA}, d(t), w(t)] \quad (3)$$

todo de acuerdo con un modelo del proceso, que obviamente debe incluir todas las perturbaciones. Como se observa, en esta clase de sistemas de control la disponibilidad de un excelente modelo del proceso es indispensable. Se asume que una buena configuración del sistema de control hará que el grupo de sensores tenga una respuesta con muy poco ruido $w(t)$ (sensores de calidad aceptable). Adicionalmente, es posible disponer de medición de las perturbaciones que están afectando el proceso $d(t)$, con el fin de anticiparse a su efecto final sobre la salida (o el estado). Es de ahí de donde proviene el nombre de esta clase de sistemas de control. En la Figura 3 se ve una estructura genérica para este tipo de sistema de control (Bennetts, 1994; Marlin, 1995).

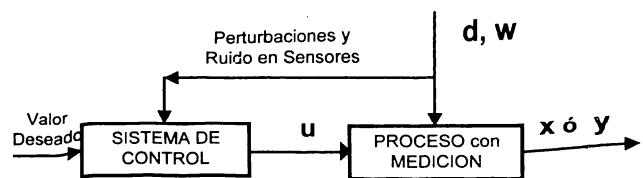


Figura 3. Estructura genérica de un sistema de control prealimentado o anticipativo.

Particularmente, es a partir del tipo de modelo usado, que puede hacerse la clasificación de segundo nivel para estos sistemas de control:

4.1.1 Modelo Entrada – Perturbación – Salida

El modelo disponible representa las relaciones entre la entrada aplicada al proceso y la salida que se obtiene cuando las perturbaciones se encuentran en un valor dado. Este modelo permite calcular la acción más apropiada que se debe aplicar en cada instante con el fin de compensar las perturbaciones externas que afectan al proceso. Es también posible el uso de un modelo inverso de las dinámicas entrada-salida y perturbación-salida, como se aplica en los esquemas de Control por Modelo Interno.

4.1.2 Modelo Entrada-Perturbación-Estado

En este caso, el modelo disponible representa las relaciones entre la entrada aplicada al proceso y el estado que se obtiene cuando las perturbaciones se encuentran en un valor determinado. Como normalmente lo que se evalúa es la salida, existirá una función adicional que relaciona el estado con la salida, por lo que puede hacerse una traducción del valor de salida deseado al valor de estado deseado, con el fin de determinar la acción de control a aplicar.

Finalmente, puede mencionarse que existe un tercer nivel de clasificación, en el cual se caracteriza el algoritmo de control por una de sus cualidades. Como se ve en la Figura 2, en este trabajo se propone utilizar como característica particulares la naturaleza estática o dinámica del modelo y del Funcional de Costo utilizado en el sistema de control, así como la realización o no de una optimización.

4.2 Sistemas de Control Retroalimentados o Reactivos

Al contrario de los sistemas prealimentados o anticipativos vistos previamente, en los sistemas retroalimentados se asume que la incertidumbre frente al comportamiento del proceso es alta, por lo que la acción de control debe calcularse de manera reactiva, es decir reaccionando a la desviación (error) que presente la salida $y(t)$ (o el estado) respecto al valor deseado $y(t)_{DESEADA}$:

$$u(t+\Delta t) = f[y(t)_{DESEADA}, y(t), u(t)] \quad (4)$$

Esto hace que sea necesario esperar a que la desviación aparezca en la salida para tomar acciones sobre la misma. De ahí toma esta clase de sistemas su nombre de reactivos, puesto que su efecto anticipativo es nulo. En la Figura 4. se presenta una estructura genérica para esta clase de sistemas de control. Como se opera realimentando valores de la salida (o estado) del proceso, puede realizarse una clasificación de segundo nivel de acuerdo con el tipo de ley de realimentación que se utilice:

4.2.1 Ley de Realimentación Estática o Invariante

En este tipo de sistemas de control la ley de realimentación está fija y parametrizada con valores predefinidos por el operador. Aunque estos valores se pueden cambiar, sólo son accesibles por el operador del sistema. Un ejemplo es la estructura del controlador PID tradicional (Stephanopoulos, 1984; Astrom and Hagglund, 1995).

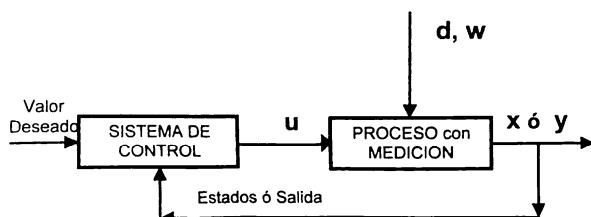


Figura 4. Estructura genérica de un sistema de control retroalimentado o reactivo.

4.2.2 Ley de Realimentación Dinámica o Variante

Contrario a la ley estática, en este caso aunque también se tienen una ley de control parametrizada, dichos valores pueden ser cambiados por el mismo sistema de control. Adicionalmente, es posible que la estructura misma de la ley de realimentación sea alterada también por el sistema de control, todo de acuerdo con algún índice o variable del proceso. Este esquema es conocido de manera general como Control Adaptable, pero con diversas variantes como el control por ganancias tabuladas (Gain Scheduling) o el control con autosintonía (Autotuning).

Cuando el sistema de control opera con una ley dinámica de realimentación, la manera en la que se logra la característica dinámica puede usarse como criterio de clasificación de tercer nivel. Como se ve en la Figura 2, el sistema de control puede operar por: Parámetros tabulados, parámetros adaptables o modelo de referencia, entre otras formas. Cuando se utilizan parámetros tabulados, el sistema de control posee una tabla en la cual se hallan los parámetros de la ley de realimentación, indizados de acuerdo con una o más variables del proceso. Esto genera un arreglo multidimensional tipo tabla, a partir del cual es posible hallar los valores de ajuste de la ley de control para cada situación determinada del proceso. Otra manera de dotar de dinámica a la ley de control es mediante un mecanismo que permita la adaptación de los parámetros de dicha ley. Finalmente, los parámetros pueden ser calculados en línea de manera permanente, contando con un modelo de referencia del comportamiento del proceso en lazo cerrado, lo que se conoce como operación por modelo de referencia (Astrom and Wittenmark, 1989).

Por su parte, cuando la ley de realimentación es estática, no es posible generar una clasificación de tercer nivel. En cambio, como se aprecia en la Figura 2, tanto para las leyes estáticas como para las dinámicas, aparece por ejemplo una clasificación de cuarto nivel que se establece de acuerdo con el tipo de señal que se realimenta: la salida o el estado.

4.3 Sistemas de Control Combinados o Predictivos

Esta clase de sistemas de control son un punto intermedio entre los sistemas anticipativos (baja incertidumbre) y los sistemas reactivos (alta incertidumbre), puesto que se asume una incertidumbre media en el comportamiento del sistema. En tales sistemas de control, se aprovecha la información de la entrada $u(t)$ y perturbaciones $d(t)$, así como la información de la salida $y(t)$ (o estado), para construir la ley de control:

$$u(t+\Delta t) = f[y(t), y(t)_{DESEADA}, u(t), d(t)] \quad (5)$$

Existen dos opciones básicas: con o sin Funcional de Costo (FC). En el primer caso, sólo se realiza una precompensación de las perturbaciones al sistema, seguida de un ajuste por retroalimentación, siempre repitiendo la misma secuencia cuando se detecta una variación en la perturbación medida. En el segundo caso, el sistema de control busca la secuencia óptima de acciones de control $[u(t+\Delta t), u(t+2\Delta t), \dots, u(t+H_C\Delta t)]$, en un horizonte de control de H_C pasos adelante. Para ello prueba diversas alternativas frente a un modelo del proceso que le permite predecir cual será el efecto final de cada una de las secuencias de control a lo largo de un horizonte de predicción dado, de longitud H_P , con $H_P \geq H_C$. Para la optimización plantea un FC que penaliza aquellas respuestas (predichas) del proceso fuera de las especificaciones del diseñador del controlador. En la Figura 5. se observa una estructura genérica para esta clase de sistema de control (Camacho and Bordons, 1995; de Oliveira, 1996).

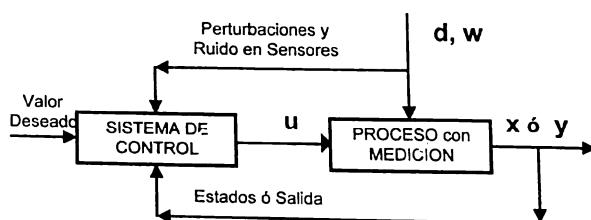


Figura 5. Estructura genérica de un sistema de control combinado o predictivo

Resulta obvio que el éxito de este tipo de sistemas de control está fuertemente ligado a la calidad de las predicciones que realiza el modelo. Por lo tanto se requieren modelos que brinden una buena predicción varios pasos adelante, por lo que se les conoce como modelos de predicción multipaso. Es a partir del modelo, corazón de los controladores predictivos, que puede hacerse la clasificación de segundo nivel.

4.3.1 Modelo Entrada-Salida

En este caso se utiliza un modelo que relaciona la entrada $u(t)$ con la salida $y(t)$ del proceso, que puede incluir efectos de prealimentación, al tomar en consideración algunas perturbaciones $d(t)$ medidas o estimadas:

$$y(t+\Delta t) = f[y(t), u(t), d(t)] \quad (6)$$

Como resulta obvio, la información entrada-salida engloba las dinámicas internas del proceso, razón por la cual pueden aparecer modos difíciles de controlar, que si pudieran explicitarse como estados del proceso podrían hacerse controlables.

4.3.2 Modelo en el Espacio de Estado

Este tipo de sistemas de control utiliza como modelo de predicción uno que relaciona los estados $x(t)$ con la entrada $u(t)$ y las perturbaciones $d(t)$ medidas o estimadas, como se ve en la siguiente versión discreta de la ecuación(1):

$$x(t+\Delta t) = f[x(t), u(t), d(t)] \quad (7)$$

Adicionalmente se cuenta con una función de salida que relaciona el estado del proceso con su salida, según la expresión discreta de la ecuación (2), sin considerar el ruido del sensor:

$$y(t+\Delta t) = g[x(t+1), u(t), d(t)] \quad (8)$$

Como ya se mencionó en el punto previo, con la representación en el espacio de estado es posible explicitar las dinámicas del proceso. Esto brinda más información para el diseño del sistema de control, aunque obliga a una estructura de control más compleja. Sin embargo, cuando se comparan estructuras de control entrada-salida con

estructuras en el espacio de estado (ambas con igual índice de desempeño), siempre resulta más compleja la estructura entrada-salida. Esto debido a que tal estructura tiene que compensar la falta de información sobre las dinámicas internas del proceso con medidas adicionales de salida o heurística en los algoritmos de control (Henson and Seborg, 1997; Álvarez, 2000).

Cualquiera de los dos tipos de sistemas de control combinado o Predictivo, puede clasificarse en un tercer nivel de acuerdo con la naturaleza estática o dinámica tanto del Funcional de Costo (FC) como del modelo utilizados en la optimización de la secuencia de control. Lo más corriente actualmente es operar con FC y modelo estático, puesto que así no se incurre en un costo computacional alto. Sin embargo es totalmente posible operar con un FC dinámico que evolucione de acuerdo con alguna condición del proceso. En tal sentido, existen algunos trabajos que incluyen dentro del FC términos dependientes de la posición actual del proceso (de Oliveira, 1996; Alvarez, 2000). Otra posibilidad es la utilización de modelos que se adapten o cambien de acuerdo con la región de operación actual del proceso. Esto permite una mejor precisión en las predicciones y por lo tanto más posibilidades de un control exitoso. Finalmente, en la propuesta actual de taxonomía se deja abierta la posibilidad de generar una clasificación de cuarto nivel para los sistemas de control combinado, de acuerdo con características puntuales del algoritmo de control, como por ejemplo el tipo específico de modelo: numérico (fenomenológico, empírico) o simbólico (borroso, neuronal).

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una propuesta de clasificación general y compacta para los sistemas de control. En cada uno de los dos niveles iniciales del árbol clasificatorio se utiliza un criterio diferente. Los niveles tercero y cuarto se dejan libres, aunque para el nivel tres se plantea un criterio para cada una de las familias de controladores establecidas en los niveles 1 y 2. La intención principal de este trabajo es la de

brindar una visión unificada de los sistemas de control, sin ambigüedades frente a la clasificación de cualquier estructura de control, existente o que aparezca en el futuro. Adicionalmente, es posible que a partir de la clasificación propuesta puedan generarse estrategias de control novedosas.

REFERENCIAS

Álvarez, H. *Control Predictivo basado en modelo borroso para el control del pH*. Temas de Automática No. 10. Editorial Fundación UNSJ. 2000.

Astrom, K. and Hagglund, T. *Automatic tuning of PID controllers*. Instrument Society of America. 1998.

Astrom, K. and Wittenmark, B. *Adaptive control*. Addison-Wesley, 1989.

Baker, W. and Farrel, J. *An introduction to connectionist learning control systems*. Chapter 2, in *Handbook of intelligent control*, edited by White, D. and Sofge, D. Van Nonstrand Reinhold. 1992.

Bennetts, F. *Real-time computer control. An introduction*. Prentice-Hall. 1994.

Camacho, E. and Bordons, C. *Model predictive control in the process industry*. Springer. 1995.

de Oliveira, S. *Model predictive control (MPC) for constrained nonlinear systems*. Ph.D. thesis. California Institute of Technology. 1996.

Henson, M. and Seborg, D. (Editors). *Nonlinear Process Control*. Prentice Hall PTR, 1997.

Himmelblau, D. and Bischoff, K. *Process analysis and simulation*. Deterministic systems. John Wiley & Sons. 1968.

Isidori, A. *Nonlinear control systems*. Springer. 1995.

Kuo, B. *Sistemas de control automático*. Prentice-Hall. 1996.

Lin, Ch. *Advanced control systems design*. Prentice-Hall. 1994.

Mah, R. *Chemical process structures and information flows*. Butterworth-Heinemann. 1990.

Marlin, T. *Process Control. Designing processes and control system for dynamic performance*. Mc Gram - Hill. 2000.

Smith, C. and Corripio, A. *Principles and practice of automatic process control.* John Wiley & Sons. 1997.

Stephanopoulos, G. *Chemical process control. An introduction to theory and practice.* Prentice/Hall International, Inc. 1984.