

La Serie Universitaria de la Fundación Juan March presenta resúmenes, realizados por el propio autor, de algunos estudios e investigaciones llevados a cabo por los becarios de la Fundación y aprobados por los Asesores Secretarios de los distintos Departamentos.

El texto íntegro de las Memorias correspondientes se encuentra en la Biblioteca de la Fundación (Castello, 77. Madrid-6).

La lista completa de los trabajos aprobados se presenta, en forma de fichas, en los Cuadernos Bibliográficos que publica la Fundación Juan March.

Estos trabajos abarcan las siguientes especialidades: Arquitectura y Urbanismo; Artes Plásticas; Biología; Ciencias Agrarias; Ciencias Sociales; Comunicación Social; Derecho; Economía; Filosofía; Física; Geología; Historia; Ingeniería; Literatura y Filología; Matemáticas; Medicina, Farmacia y Veterinaria; Música; Química; Teología. A ellas corresponden los colores de la cubierta.

Edición no venal de 300 ejemplares, que se reparte gratuitamente a investigadores, Bibliotecas y Centros especializados de toda España.

Este trabajo fue realizado con un Programa de la Convocatoria del año 1973. Departamento de Ingeniería.

Fundación Juan March



FJM-Uni 24-Mar  
Moderna teoría de control, método ada  
Martín Sánchez, Juan Manuel.  
1031238



Biblioteca FJM

Fundación Juan March (Madrid)

SERIE UNIVERSITARIA



Fundación Juan March

# Moderna teoría de control: método adaptativo-predictivo. Teoría y realizaciones

Juan Manuel Martín Sánchez

FJM  
Uni-  
24  
Mar

24

Moderna teoría de control: método adaptativo-predictivo. Juan Manuel Martín Sánchez

24



Fundación Juan March  
Serie Universitaria

24



Moderna teoría  
de control: método  
adaptativo-predictivo.  
Teoría y realizaciones

Juan Manuel Martín Sánchez



Fundación Juan March  
Castelló, 77. Teléf. 225 44 55  
Madrid - 6

Fundación Juan March (Madrid)

*La Fundación Juan March no se solidariza  
necesariamente con las opiniones de los  
autores cuyas obras publica.*

Depósito Legal: M - 8858 - 1977  
I. S. B. N.: 84 - 7075 - 046 - 1  
Ibérica, Tarragona, 34.- Madrid-7

# I N D I C E

I.— UNA VISION GENERAL DE LA MODERNA TEORIA DE CONTROL Y DE LOS PROBLEMAS PLANTEADOS EN EL DOMINIO INDUSTRIAL.	Página
Resumen . . . . .	1
I. 1 Introducción . . . . .	2
I. 2 Reguladores P.I.D.: Primera Epoca de la Teoría del Control . . . . .	4
I. 3 El Control de Procesos en la Optica de la Teoría del Control Optimo . . . . .	5
I. 4 Una Visión Real de los Problemas de Control . . . . .	6
I. 5 Breve Crítica de la Teoría del Control Optimo . . . . .	7
I. 6 Sistemas Adaptativos: Avances Teóricos y Resultados Prácticos . . . . .	8
I. 7 Conclusiones: Importancia Actual y Futura de la Teoría de Control . . . . .	13
II.— CONTROL DE PROCESOS POR CALCULADOR DIGITAL: METODO ADAPTATIVO—PREDICTIVO.	
Resumen . . . . .	15
II. 1 Introducción . . . . .	16
II. 2 Filosofía y Modos de Operación . . . . .	16
II. 3 Secuencia Básica de Operaciones . . . . .	18
II. 4 Estabilidad Asintótica del SCAP . . . . .	20
II. 5 Generalidad de la Solución . . . . .	21
II. 6 Diseño del Bloque de Consigna . . . . .	22
II. 7 Diferencias de Estructuras y Presencia de Perturbaciones . . . . .	23
II. 8 Comparación con otros Métodos y Respuesta a los Importantes Problemas Planteados en el Control de Procesos . . . . .	24
II. 9 Conclusiones . . . . .	26

III.— RECIENTES REALIZACIONES DEL CONTROL ADAPTATIVO—  
PREDICTIVO EN LOS DOMINIOS INDUSTRIAL Y AEROESPACIAL

Resumen . . . . .	29
III. 1 Introducción . . . . .	29
III. 2 Diseño y Evaluación de un Piloto Automático para el Control de las Características Longitudinales del Avión Supersónico F-8 . . . . .	30
2.1 Interés y Objetivo del Control Dinámico del Angulo de Elevación de un Avión . . . . .	30
2.2. Trabajos Previos en esta Area . . . . .	31
2.3. Enfoque del Diseño y Objetivo del Proyecto . . . . .	32
2.4. Experimentos y Resultados . . . . .	32
2.4.a Comportamiento Adaptativo del Piloto Automático . . . . .	33
2.4.b Control del Avión Inherente Inestable . . . . .	33
2.5 Análisis Resumido de los Resultados Obtenidos con el Piloto Automático . . . . .	33
III.3 Control Mono y Multivariable de una Columna de Destilación . . . . .	38
3.1. Equipo Experimental . . . . .	38
3.2. Experimentos y Resultados Obtenidos . . . . .	40
3.3. Análisis Resumido de los Resultados Obtenidos en el Control de la Columna . . . . .	41
III.4 Conclusiones: Significación y Transcendencia del Sistema de Control Adaptativo-Predictivo . . . . .	45
Referencias . . . . .	47

*CAPITULO I. - UNA VISION GENERAL DE LA MODERNA TEORIA DE CONTROL Y DE LOS PROBLEMAS PLANTEADOS EN EL DOMINIO INDUSTRIAL.*

*Resumen:*

*Esta edición de la Serie Universitaria desea mostrar y sopesar la validez de una nueva solución en Teoría de Control. El objeto de este número es de divulgación e información. Con el fin inicialmente señalado, este capítulo presenta una visión general e historia del Problema de Control y un compendio crítico de la Teoría hasta ahora desarrollada, poniendo de relieve sus restricciones de aplicabilidad como consecuencia de los problemas que el dominio industrial plantea.*

## I. 1 INTRODUCCION

*Cualquier proyecto de control numérico de un proceso dinámico, sea industrial ó aéroespacial, tiene básicamente que tener en cuenta los tres aspectos que a continuación se enumeran:*

- 1. - Utilización de un calculador digital.*
- 2. - Captación de información del proceso por medio de una instrumentación adecuada.*
- 3. - Aplicación de una teoría ó método de mando capaz de elaborar un control apropiado y consecuente con un criterio previamente establecido.*

*La introducción de la Informática alrededor de los años 60, y el extraordinario desarrollo tecnológico que los calculadores digitales han experimentado recientemente, hacen que la elección y utilización de un calculador ó pequeño calculador, a precios cada vez más razonables, no constituya actualmente ningún problema. El aspecto instrumentación puede representar, dependiendo de la complejidad ó incluso la posibilidad de la medida, un factor limitativo. No obstante, los recursos de que hoy en día dispone la Instrumentación permiten considerar el control de una gran mayoría de procesos.*

*Sin embargo disponiendo de medios de instrumentación y de una informática perfeccionada y ampliamente comercializada, los proyectos de control de procesos industriales, o de aviones, utilizando un calculador digital son extremadamente escasos, y las aplicaciones realizadas están lejos de alcanzar los límites de rendimiento posibles.*

*Las razones de este hecho residen lógicamente en el tercer aspecto señalado inicialmente.*

*En correspondencia con el interés envuelto, un enorme esfuerzo de investigación a escala mundial se ha venido realizando en este dominio tecnológico. Numerosas tesis doctorales y costosos programas de investigación se han y se siguen desarrollando para intentar resolver, en forma general ó específica, los problemas teóricos o metodológicos que el control de procesos plantea.*

*Los mejores resultados de este inmenso esfuerzo son generalmente conocidos como Moderna Teoría de Control. Las aplicaciones prácticas de*

los métodos desarrollados por esta Teoría, no han tenido el impacto que en los primeros momentos de entusiasmo se había vaticinado. Estos resultados han sido objeto de abundantes debates y publicaciones /15,17,38 /.

En los últimos años un diálogo de sordos parece existir entre los hombres "teóricos" y los "prácticos" en control de procesos. Mientras los primeros realizan complejos ejercicios académicos, objeto de múltiples publicaciones, los segundos se muestran reacios a aceptar formulaciones matemáticas de una cierta complicación en aplicaciones prácticas. Como ha sido frecuentemente señalado existe un vacío importantes entre la Teoría considerada y la práctica /47/. Finalmente, unos y otros reconocen la dificultad de los problemas planteados y la ausencia de soluciones adecuadas.

En una crítica a la Moderna Teoría de Control /15/, un Profesor de la Universidad de California, señala que los problemas planteados necesitarán para su resolución una nueva e imaginativa aportación teórica.

En esta edición de la Serie Universitaria se desea mostrar y sopesar la validez de una nueva solución en Teoría de Control. Dicha solución había sido básicamente desarrollada en /27/ y, posteriormente, ha sido extendida teóricamente y aplicada a procesos reales gracias a un programa de investigación de dos años de duración sufragado por la Fundación Juan March /25, 28 /.

Durante la realización del mencionado programa las dos aplicaciones prácticas de mayor relieve han sido:

1. - Diseño de un piloto automático para el avión supersónico de la NASA F-8. La eficiencia de dicho piloto se probó utilizando la simulación de alta fidelidad del Charles Stark Draper Laboratory, Cambridge, Massachusetts, E. E. U. U.
2. - Control multivariable de una columna de destilación binaria. Este proyecto fue llevado a cabo en el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Alberta, Edmonton, Canada.

La elección de dichas aplicaciones tuvo como objeto abordar directamente los problemas no resueltos previamente considerados. Los resultados en ellas obtenidos confirmaron la justeza de la solución propuesta.

La presente edición tiene un propósito de divulgación e información, en consecuencia vamos a prescindir en lo posible de los desarrollos y demostra-

ciones matemáticas, que en toda su extensión han sido llevados a cabo en /25,28 /. Nos centraremos pues, suscintamente, en los aspectos conceptuales y en los resultados prácticos más relevantes obtenidos. Una exposición amplia y detallada de todos ellos puede encontrarse en /28/.

El resto de este capítulo pretende ilustrar y ampliar en detalle los puntos más importantes en este apartado expuesto. En consecuencia, vamos a presentar una visión general e histórica del Problema de Control y un compendio crítico de la Teoría hasta ahora desarrollada, poniendo de relieve sus restricciones de aplicabilidad.

## I.2 REGULADORES P. I. D. : PRIMERA EPOCA DE LA TEORIA DE CONTROL

La Automática nació en el curso de la segunda guerra mundial, desde entonces y hasta el final de los años 50, se desarrolló y puso en práctica toda una primera época de la Teoría de Control. Fruto de ella son los reguladores analógicos de acción proporcional, integral y derivada, P. I. D., que actualmente constituyen una gran mayoría de las aplicaciones industriales.

Durante esta primera época el medio de representar los sistemas era su ecuación diferencial o su función de transferencia. A pesar de su simplicidad teórica y de su campo de acción limitado, el mercado de los reguladores P. I. D. es todavía muy vigoroso, pues corresponden a una realidad económica indiscutible gracias a su satisfactoria relación coste / rendimiento.

Sus inconvenientes son importantes y podemos centrarlos en tres puntos:

- a) Defectos genéricos de los sistemas analógicos: ausencia de memoria, débil precisión e inestabilidad con el tiempo.
- b) No se pueden implantar métodos de optimización, ninguna iteración es posible.
- c) Son difíciles de poner en marcha ó inoperantes con sistemas complejos: sistemas multivariables, sistemas con retardos puros, sistemas marcadamente no lineales, etc.

Sin embargo, pensar en suprimirlos absolutamente no es razonable, dado que pueden servir como sistemas de seguridad en caso de avería de un sistema numérico de más satisfactorio rendimiento.

### I.3 EL CONTROL DE PROCESOS EN LA OPTICA DE LA TEORIA DEL CONTROL OPTIMO

Alrededor de los años 60, la introducción de los calculadores digitales permite considerar soluciones numéricas en continuidad con las analógicas existentes. Más aún, las posibilidades abiertas permiten resolver problemas que antes no se podían abordar y, en general, mejorar ampliamente e incluso optimizar el rendimiento en el control de procesos. Es decir, el cambio aportado es profundo y cualitativo.

En el intento por encontrar las nuevas soluciones nace la Teoría del Control Optimo [34] ., hasta hoy el resultado más significativo de la Moderna Teoría de Control.

De una forma conceptual podemos decir que esta Teoría resuelve el problema de control cuando éste se plantea según las siguientes premisas:

- 1.- El proceso es lineal.
- 2.- Su representación de estado se supone conocida.
- 3.- Las perturbaciones que actúan sobre el proceso responden a ciertas características estadísticas conocidas.
- 4.- Se elige un criterio cuadrático, en general función del control y del estado del proceso.

Con este planteamiento la mencionada Teoría es capaz de realizar la estimación estadística óptima del estado del proceso [16] . Un control que minimiza el criterio cuadrático establecido puede ser aplicado al proceso, a partir de la citada estimación [3] .

La minimización del criterio elegido confiere al control aplicado el calificativo de óptimo, aunque la relatividad de este adjetivo es obvia.

La puesta en práctica de esta Teoría requiere inevitablemente una identificación previa del proceso, para llegar a conocer su representación de estado. Con este motivo gran parte del esfuerzo de investigación de la última década ha estado orientado a obtener eficaces y fiables métodos de identificación. En correspondencia con la diversidad de soluciones, hoy se dispone de una extensa literatura [5, 13, 37, 48] .

Sin profundizar en más detalles señalaremos que esta Teoría es interesante, estructurada y rica, pero antes de considerar su crítica debemos examinar los problemas reales que el control de procesos plantea.

#### I.4 UNA VISION REAL DE LOS PROBLEMAS DE CONTROL

*El proceso industrial es básicamente no lineal, es decir, el comportamiento global del proceso no puede ser representado por ecuaciones diferenciales lineales. Sin embargo, frecuentemente durante el normal funcionamiento del proceso, sus variables oscilan alrededor de ciertos valores de equilibrio. En general, se conviene en suponer que alrededor de estos valores las ecuaciones que rigen el comportamiento del proceso admiten una linearización.*

*La posibilidad de esta linearización, y en consecuencia de la identificación y modelización del proceso, es no obstante afectada por dos circunstancias que habitualmente concurren en el dominio industrial y que señalamos a continuación [36, 47 ]:*

- a) El proceso industrial se produce, en general, bajo el efecto del calor y en presencia de fenómenos distribuidos de conducción, de convección, transferencia, etc. Todo ello hace que el orden de las ecuaciones capaces de representarlo sea muy elevado.*
- b) El proceso es siempre mal conocido, mal definido, varía con el tiempo, las condiciones exteriores, la carga que se le pide, etc. Es por ello que a las perturbaciones de estado clásicas, entradas parásitas y ruidos de medida, se suman las perturbaciones de estructura, es decir las variaciones no previsibles de los parámetros del proceso.*

*Con referencia al dominio aéroespacial, mientras que en el espacio exterior la ausencia de rozamientos y la fidelidad de las medidas hacen que el proceso, en este caso un cuerpo en un campo de fuerzas, sea relativamente fácil de modelizar; en el espacio atmosférico las circunstancias no son las mismas. Si consideramos el comportamiento dinámico de las características longitudinales de un avión pondremos de relieve las siguientes circunstancias:*

- 1.- Las condiciones de vuelo influyen decisivamente sobre la dinámica del avión.*
- 2.- En una misma condición de vuelo, la respuesta dinámica del avión dependerá del signo y la magnitud del control.*

*En consecuencia, si la linearización alrededor de unos determinados valores de equilibrio resulta comprometida, en el curso de operaciones de vuelo normales resulta inviable, [42].*

*Teniendo en cuenta los hechos aquí expuestos, realizaremos una crítica consecuente de la Teoría del Control Optimo considerada en el apartado anterior.*

## I.5 BREVE CRITICA DE LA TEORIA DEL CONTROL OPTIMO

*La excelente argumentación matemática de la Teoría del Control Optimo, parte de unas premisas con una reducida aplicabilidad práctica o poco realistas cuando se considera el dominio industrial.*

*Los dos problemas fundamentales y que se deducen directamente de las circunstancias expuestas en el apartado anterior, son los siguientes:*

- a) Problema de la diferencia de estructuras. - El problema así denominado, plantea el dilema entre la elección de un modelo del proceso de orden excesivamente elevado para ser lógico, y un modelo reducido que afecta a las bases teóricas y, en consecuencia, al rendimiento del sistema de control /43 /.*
- b) Problema de la variación de los parámetros. - De hecho la Teoría de Control Optimo no considera teóricamente esta posibilidad, y por lo tanto su rendimiento es extremadamente sensible a este problema /17 /.*

*Por otra parte, como se ha señalado repetidas veces por los ingenieros de control /15,17,47 /, un proyecto de control industrial basado en esta Teoría, encuentra además en su realización las dificultades de orden práctico que consideramos a continuación:*

- 1.- Identificación difícil y costosa. - En el mejor de los casos, para evitar que el resultado de la identificación dependa de las entradas que han excitado al proceso, la señal de control deberá tener un contenido frecuencial capaz de sensibilizar todos los parámetros del mismo. Una señal de este tipo representa un inconveniente importante para cualquier proyecto de identificación de un proceso industrial. Por otra parte el tiempo de estudio y cálculo necesario, hace en ocasiones difícil justificar económicamente un proyecto de control óptimo.*
- 2.- Dificultad para definir un criterio adecuado. - La complejidad del proceso, en especial si es multivariable, hace difícil definir un criterio adecuado, y darle un significado físico, a través de un simple índice escalar. Sin embargo la elección del criterio tiene una importancia crucial en la aplicación del sistema de control.*

*En el espacio exterior la Teoría del Control Optimo ha tenido notables éxitos, dado que sus hipótesis eran acordes a las circunstancias reales. Sin em-*

bargo en el control dinámico de aviones, debido a la no linealidad básica del proceso, no puede considerarse que dicha Teoría tenga mayores posibilidades de las que tiene en el dominio industrial.

*Acabaremos con un comentario en relación a su filosofía:*

*De acuerdo con esta Teoría, durante el control de un proceso, la información que las salidas del proceso aportan, es juzgada y utilizada, en función de un modelo preestablecido, para elaborar el mando. Sin embargo, esta información no es utilizada para poner en cuestión ó adaptar el modelo considerado, y en este sentido es desperdiciada.*

*Dada la naturaleza de los problemas presentes, esta formulación no puede dar una respuesta adecuada. Es por ello que como parte de la Moderna Teoría de Control, los Sistemas Adaptativos, que examinaremos a continuación, se han desarrollado en un intenso por responder a las cuestiones pendientes.*

## I.6 SISTEMAS ADAPTATIVOS : AVANCES TEORICOS Y RESULTADOS PRACTICOS

*Entre los sistemas adaptativos desarrollados hasta ahora, merecen especial atención las dos bien conocidas líneas de investigación siguientes:*

- a) Reguladores Auto-Ajustables.*
- b) Sistemas Adaptativos con Modelo de Referencia (S. A. M. R.).*

*Ambas serán objeto de un breve examen con el fin de valorar su significado y aportación.*

- a) Reguladores Auto-Ajustables.*

*Como escuela del análisis realizado en el apartado anterior, y en vistas a mejorar el rendimiento de la Teoría del Control Optimo, parece indispensable la adaptación del modelo en el transcurso del tiempo a partir de las entradas y salidas del proceso.*

*La directa aplicación de esta idea, ha llevado a la concepción de los reguladores auto-ajustables [2, 7], cuyas líneas generales de funcionamiento se pueden definir en los siguientes puntos:*

- 1.- Los parámetros de un modelo entrada-salida del proceso son estimados en tiempo real por medio del método de los mínimos cuadros.*
- 2.- La ley de control aplicada utiliza la estimación paramétrica considerada en el punto anterior.*

- 3.- *Dicha ley de control ha sido elegida porque minimiza la variancia del error, cuando los parámetros del modelo entrada-salida del proceso son conocidos.*

*Esta formulación tiene lógicamente dos orientaciones positivas:*

- *Su caracter adaptativo puede mejorar el rendimiento de los sistemas de control con parámetros fijos, en presencia de variaciones de los parámetros del proceso.*
- *Desde el punto de vista práctico la utilización de un modelo entrada-salida no obliga a una estimación de las variables de estado del proceso.*

*No obstante, cabe señalar las siguientes restricciones teóricas en el actual desarrollo, de los reguladores auto-ajustables:*

- *Aunque elegida de una forma razonable, la ley de control, no esta basada en un criterio matemático formal, ya que utiliza la estimación y no los verdaderos valores de los parámetros del proceso.*
- *No existe un criterio que garantice la estabilidad del sistema de control.*
- *Su generalidad es restringida.*
- *No aporta una solución al problema de diferencia de estructuras considerado en el apartado anterior.*

*Asimismo es de señalar que estos reguladores originan desviaciones permanentes en la salida del proceso, con respecto al valor de consigna, y la corrección teórica de las mismas, [11], va en detrimento del rendimiento global.*

*La aplicación de esta técnica está actualmente basada más en la experiencia adquirida que en resultados teóricos originales. Sin embargo algunas realizaciones sobre procesos reales han sido llevadas a cabo con resultados razonables [8, 9]. Por ello, concluiremos que pese a su debilidad teórica, son relativamente simples de aplicar, y su caracter ajustable puede conferirles un cierto campo de aplicaciones industriales, pero su actual desarrollo representa una respuesta ciertamente limitada al problema de control.*

*b) Sistemas Adaptativos con Modelo de Referencia.*

*La configuración básica de los S. A. M. R. aparece en la figura I. 1. La salida del modelo de referencia constituye el índice de rendimiento deseado, la salida del sistema ajustable es el índice de rendimiento obtenido. La diferencia entre ambos recibe el nombre de error ó error generalizado, a partir*

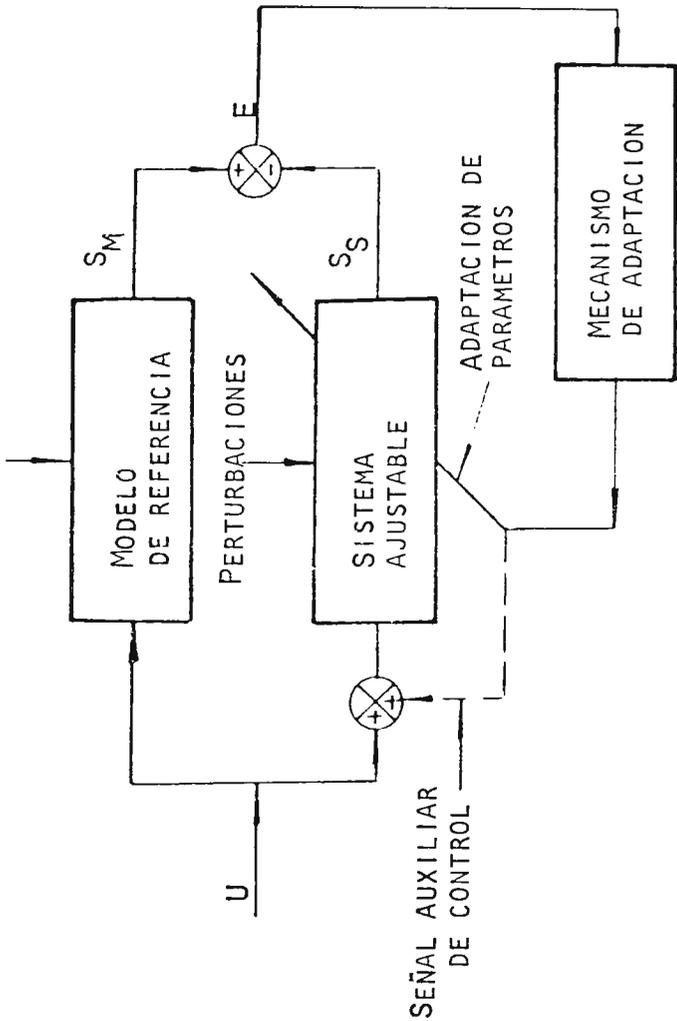


FIGURA I.1. - CONFIGURACION BASICA DE LOS S.A.M.R.

del cual el mecanismo de adaptación modifica ciertos parámetros del sistema ajustable, ó genera una señal de control auxiliar, con el fin de minimizar dicho error.

Se puede enunciar dos formas de considerar la aplicación de un control adaptativo a partir de los S. A. M. R. hasta ahora desarrollados:

1ra. - Control Adaptativo Indirecto, la aplicación del cual requiere una identificación en tiempo real de los parámetros y variables de estado del proceso.

2da. - Control Adaptativo Directo, que no requiere la mencionada identificación.

La estructura general para la aplicación de los S. A. M. R. al Control Adaptativo Indirecto aparece en la figura I.2.

La señal de control es en este caso elaborada por un regulador ajustable que se sirve de la información que le aporta un sistema adaptativo con modelo de referencia, que identifica en tiempo real al proceso. En dicho S. A. M. R. se puede apreciar que el lugar del modelo de referencia lo ocupa el proceso y el sistema ajustable ha pasado a ser un modelo ajustable.

Aunque algunas experiencias prácticas esperanzadoras se han llevado a cabo, [41], la concepción teórica de este tipo de aplicación presenta, entre otras, dos características limitativas importantes:

- Aunque en algunos casos el sistema de identificación (S. A. M. R.) esté diseñado atendiendo a un criterio de estabilidad, la estabilidad del sistema de control no está asegurada.
- No aporta una solución al problema de la diferencia de estructuras.

Cuando se quieren utilizar los S. A. M. R. para la aplicación de un control adaptativo directo, estos adquieren la estructura general que aparece en la figura I.3.

En este caso, el sistema ajustable está compuesto por el proceso a controlar y por un regulador ajustable, cuyos parámetros son modificados por el mecanismo de adaptación, con el fin de que la respuesta del proceso sea tan próxima como sea posible de la del modelo de referencia.

Este tipo de control ha sido utilizado en [19], para mejorar el rendimiento de los sistemas lineales para el seguimiento de un modelo, [44]. Entre otros, los principales inconvenientes que los autores señalan se deben a que este sistema requiere un cierto conocimiento de los parámetros y variables de estado del pro

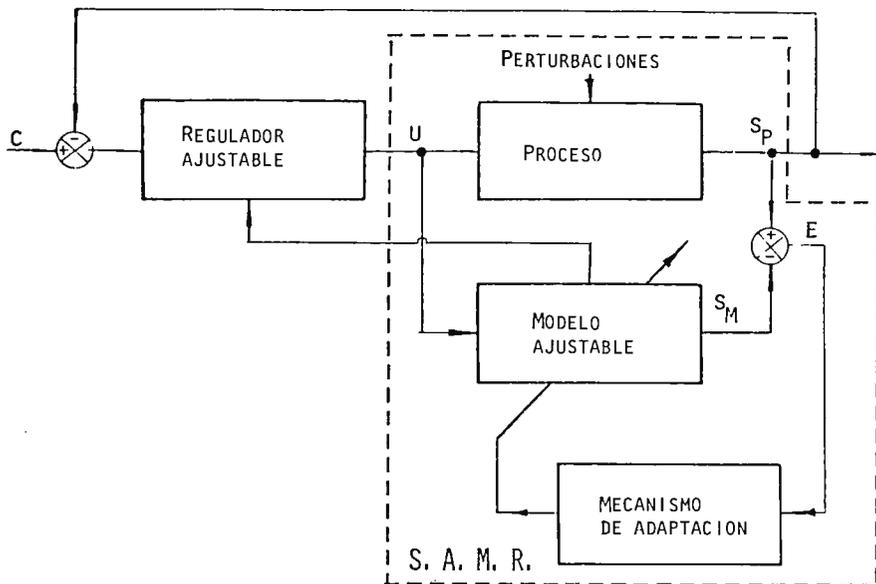


FIGURA I.2. - APLICACION DE LOS S.A.M.R. AL CONTROL ADAPTATIVO INDIRECTO

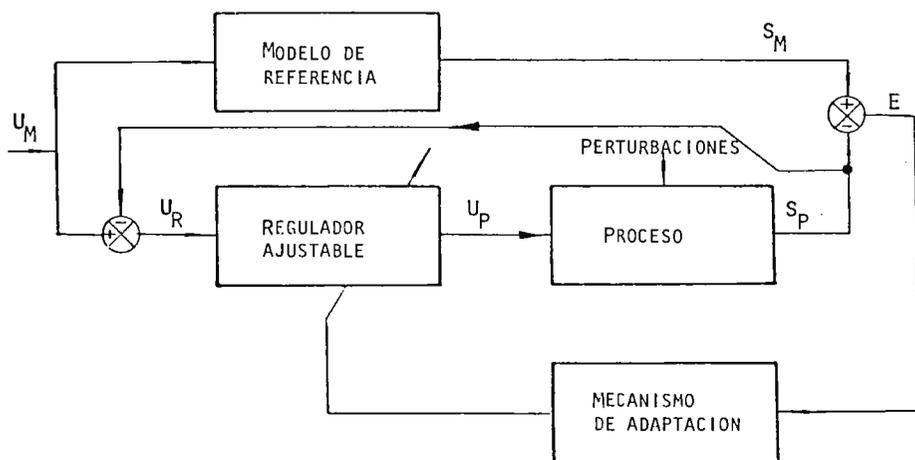


FIGURA I.3. - APLICACION DE LOS S.A.M.R. AL CONTROL ADAPTATIVO DIRECTO

ceso.

*En resumen, se puede decir que los S.A.M.R. constituyen hoy una bien definida técnica, sin embargo hasta el momento no han sido capaces de dar una respuesta satisfactoria y general a los importantes problemas planteados.*

*En un examen a la Teoría y aplicaciones de los S.A.M.R. /18 /, en la cual se presenta el "estado del arte" basado en 253 referencias, el autor acaba concluyendo: " El número de aplicaciones de los S.A.M.R. estará determinado en parte por nuevas mejoras en los métodos de diseño y el desarrollo de las técnicas de aplicación ".*

### I.7 CONCLUSIONES : IMPORTANCIA ACTUAL Y FUTURA DE LA TEORIA DE CONTROL

*La introducción de los calculadores digitales, y su extraordinario desarrollo tecnológico, que recientemente ha culminado con la aparición de los asequibles microcalculadores, marca y significará un cambio cualitativo en aspectos fundamentales de la evolución del mundo industrial.*

*Hasta pocos años antes de dicha introducción, desde el inicio de la revolución industrial, el progreso tecnológico había puesto su mayor énfasis en el desarrollo de nuevos bienes de producción y servicios, en sus aspectos metodológicos de diseño y construcción, de acuerdo con las necesidades e incentivos del momento. Durante este período la atención acordada a los aspectos de control quedaba, en el mejor de los casos, al nivel de un arte.*

*La nueva y competitiva era de los rápidos cambios tecnológicos y de la exploración espacial, que acaba de iniciarse, dispone del conocimiento y la experiencia, hasta ahora adquiridos, en el campo del diseño y construcción de sistemas físicos con específicas funciones. Aunque nuevos e importantes adelantos son susceptibles de acaecer en este campo, los modernos medios de cálculo e instrumentación permiten, ahora, considerar con especial atención los aspectos de control antes secundarios.*

*El interés que la moderna sociedad industrial tiene en este dominio está en relación con las necesidades y exigencias que se le plantean, tales como:*

- *Mejora del rendimiento y manejabilidad de los sistemas físicos.*
- *Perfeccionamiento cuantitativo y cualitativo en el diseño de procesos.*
- *Ahorro de energía.*
- *Conservación del medio ambiente, etc.*

*Los enormes incentivos económicos envueltos han llevado a los países industriales más adelantados a dedicar grandes recursos a esta área de la investigación tecnológica. Sin embargo la Moderna Teoría de Control hasta ahora desarrollada no ha podido dar una respuesta a los principales problemas presentes en proyectos de control de carácter industrial. En los capítulos que siguen vamos a presentar la nueva solución mencionada en la Introducción en sus aspectos conceptual, de diseño y aplicabilidad, así como una síntesis de los resultados obtenidos en las aplicaciones prácticas llevadas a cabo.*

CAPITULO II.- CONTROL DE PROCESOS POR CALCULADOR DIGITAL :  
METODO ADAPTATIVO - PREDICTIVO.

Resumen:

*Este capítulo presenta el Sistema de Control Adaptativo-Predictivo ( SCAP ), /25,27,28 /, en forma conceptual y de divulgación. Este Sistema puede ser aplicado a procesos lineales multivariables con parámetros desconocidos y variables con el tiempo, y con retardos puros aproximadamente conocidos. Asimismo incluye la posibilidad de utilizar las medidas de las perturbaciones que puedan actuar sobre el proceso para eliminar su efecto. El SCAP requiere unicamente la información que las entradas y salidas del proceso le aportan y, en consecuencia, una estimación del estado del proceso no es necesaria. Introduce el concepto de bloque de consigna, que elabora la salida deseada para el proceso. La señal de control es generada por un bloque de mando colocado en serie con el proceso. Dicho bloque de mando se comporta como un modelo adaptativo inverso del proceso y su entrada es la salida deseada para el proceso. El SCAP es asintóticamente estable y da una respuesta positiva a los principales problemas encontrados en el control de procesos, es decir, el problema de la diferencia de estructuras y el de la variación de parámetros. Además se comporta satisfactoriamente bajo la influencia de perturbaciones no medibles y es extremadamente simple de aplicar.*

## II.1 INTRODUCCION

*El Sistema de Control Adaptativo-Predictivo ( SCAP ), que vamos a presentar, ha sido aplicado, en el curso de un programa de investigación de dos años de duración, a procesos que pueden ser considerados ejemplos clásicos de las dificultades encontradas por la Moderna Teoría de Control en los dominios industrial y aeroespacial.*

*La experiencia hasta ahora adquirida, y los excelentes resultados obtenidos en las mencionadas aplicaciones prácticas, nos permiten considerar con razonable esperanza que dicho Método, que hemos denominado Adaptativo-Predictivo, puede acabar con el actual vacío entre Teoría y práctica en el área de control de procesos.*

*Este capítulo expondrá brevemente los principales conceptos en los que el Método está basado, así como las operaciones necesarias para su aplicación y sus características más relevantes.*

## II.2 FILOSOFIA Y MODOS DE OPERACION

*El SCAP , por medio de un computador digital, puede llevar a cabo el control adaptativo de procesos mono ó multivariables, con parámetros desconocidos y variables con el tiempo, con o sin retardos puros. Dicho control es realizado de tal manera que el vector de salida del proceso es predicho y el vector de control, que debe aplicarse al proceso, es calculado con el fin de que el vector de salida predicho sea igual al vector de salida deseado. Todo ello se efectúa en cada instante de muestreo o control por medio de un número reducido y específico de operaciones aritméticas.*

*La estructura general de SCAP aparece en la figura II. 1, donde se muestran para cada instante de muestreo  $k$  los dos posibles modos de actuación, a saber:*

*1.- Siguiendo el camino 1, un operador humano ó automático puede directamente imponer el vector de control  $\underline{u}(k)$ , que es el vector de entrada al proceso y al bloque de identificación en el instante  $k$ . Dicho bloque de identificación utiliza un modelo, que denominaremos asimismo adaptativo-predictivo, para calcular una estimación del vector de salida del proceso en el instante  $k$ ,  $\underline{d}(k)$ . El error de esta estimación  $\underline{e}(k)$ , que es la diferencia entre el vector de salida del proceso  $\underline{y}(k)$  y  $\underline{d}(k)$ , se utiliza para ajustar a través de un mecanismo de adaptación los parámetros del modelo previamente considerado.*

*Este modo de operación recibe el nombre de acción pasiva ó de identificación*

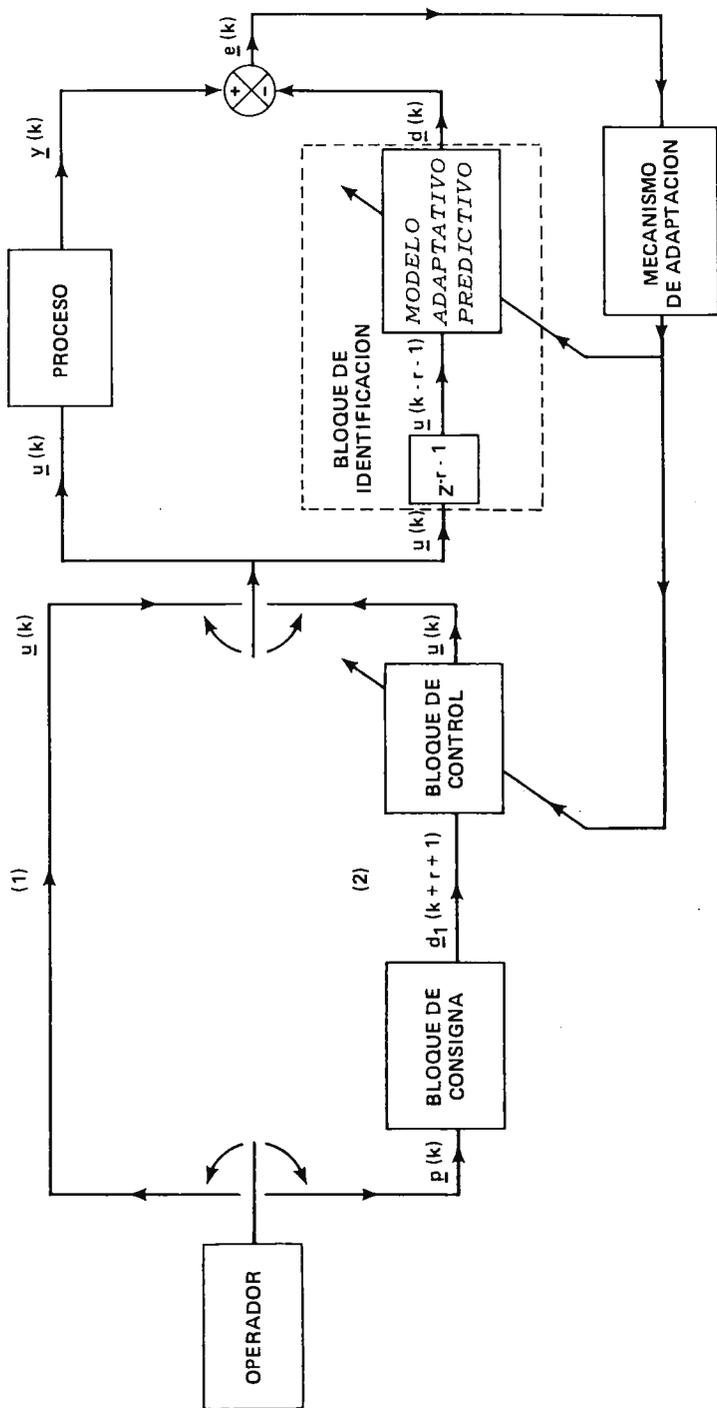


Figura II.1 . - Estructura General del SCAP.

dado que en él el SCAP se comporta unicamente como un sistema de identificación.

2.- Siguiendo el camino 2, los parámetros del modelo adaptativo-predictivo serán ajustados de la misma forma que siguiendo el camino 1. Sin embargo, en este caso, el vector de mando que se aplicará al proceso será calculado por el bloque de control utilizando el mencionado modelo adaptativo-predictivo una vez ajustado. Dicho cálculo será tal que el vector salida deseada para el proceso en el instante  $k+r+1$ ,  $\underline{d}_1(k+r+1)$ , será igual al vector de salida predicho en el mismo instante. Siendo  $r$  el número de periodos de muestreo de retardo que posee, ó que se considera convenientemente que posee, el proceso. El vector  $\underline{d}_1(k+r+1)$  será calculado en el instante  $k$  por el bloque de consigna, en respuesta a las entradas que le envía el operador.

Este modo de operación del SCAP recibe el nombre de acción de control.

### II.3 SECUENCIA BASICA DE OPERACIONES

Las operaciones básicas que el SCAP ejecutará, en cada instante de muestreo  $k$ , durante su acción de control se describen a continuación:

- a) Medida y, si se considera conveniente, filtraje de las variables de salida del proceso para obtener el vector de salida  $\underline{y}(k)$ , cuya dimensión consideramos igual a  $n$ .
- b) Cálculo de la salida del proceso estimada  $\underline{d}(k)$ , por medio del modelo adaptativo-predictivo del bloque de identificación que definimos según la siguiente ecuación:

$$\underline{d}(k) = \sum_{i=1}^h \tilde{A}_i(k-1) \underline{y}(k-i-r) + \sum_{i=1}^f \tilde{B}_i(k-1) \underline{u}(k-i-r) + \sum_{i=1}^g \tilde{C}_i(k-1) \underline{w}(k-i-r) \quad (1)$$

Donde  $\underline{u}(k-i-r)$  y  $\underline{w}(k-i-r)$  son los vectores de entrada y perturbaciones, en los instantes  $k-i-r$ , de dimensiones  $n$  y  $m$  respectivamente (\*). En la ecuación (1) los enteros  $h$ ,  $f$  y  $g$  pueden ser elegidos convenientemente. El entero  $r$  dependerá de los retardos del proceso en cuestión. Las matrices  $\tilde{A}_i(k-1)$  y  $\tilde{B}_i(k-1)$  y  $\tilde{C}_i(k-1)$  tienen dimensiones apropiadas y sus valores corresponden al instante  $k-1$ .

- c) Cálculo del vector error de estimación por medio de:

(\*) Nota.- Si la dimensión de  $\underline{u}(k-i-r)$  es mayor que la de  $\underline{y}(k)$ , condiciones suplementarias pueden añadirse para hacerlas iguales, ó simplemente algunos de los elementos del vector de entrada pueden ser incluidos en el vector de perturbaciones.

$$\underline{e}(k) = \underline{y}(k) - \underline{d}(k) \quad (2)$$

- d) Cálculo de los valores correspondientes al instante  $k$  de los parámetros  $\tilde{a}_{ipq}(k)$ ,  $\tilde{b}_{ipq}(k)$  y  $\tilde{c}_{ipq}(k)$ , que son elementos en la línea  $j$  y la columna  $q$  de las matrices  $\tilde{A}_j(k)$ ,  $\tilde{B}_j(k)$  y  $\tilde{C}_j(k)$ , respectivamente, por medio de los siguientes algoritmos:

$$\tilde{a}_{ipq}(k) = \beta_{aipq} \alpha_p(k) e_p(k) \gamma_q(k-i-r) + \tilde{a}_{ipq}(k-1) \quad (i=1, h; p=1, n; q=1, n) \quad (3)$$

$$\tilde{b}_{ipq}(k) = \beta_{bipq} \alpha_p(k) e_p(k) u_q(k-i-r) + \tilde{b}_{ipq}(k-1) \quad (i=1, f; p=1, n; q=1, n) \quad (4)$$

$$\tilde{c}_{ipq}(k) = \beta_{cipq} \alpha_p(k) e_p(k) w_q(k-i-r) + \tilde{c}_{ipq}(k-1) \quad (i=1, g; p=1, n; q=1, m) \quad (5)$$

Estos algoritmos corresponden a las conocidas técnicas de estimación paramétrica que utilizan el método del gradiente [32], el cual minimiza una función del cuadrado del error de estimación. En ellos  $e_p(k)$ ,  $\gamma_q(k-i-r)$ ,  $u_q(k-i-r)$  y  $w_q(k-i-r)$  son los correspondientes componentes de los vectores  $\underline{e}(k)$ ,  $\underline{y}(k-i-r)$ ,  $\underline{u}(k-i-r)$ , y  $\underline{w}(k-i-r)$ , respectivamente.  $\beta_{aipq}$ ,  $\beta_{bipq}$ ,  $\beta_{cipq}$  son coeficientes que pueden ser convenientemente elegidos y ajustados.  $\alpha_p(k)$  es una función de  $k$  que, como trataremos en el apartado siguiente, bajo ciertas condiciones asegura la hiperestabilidad asintótica del sistema de identificación, es decir, que  $\underline{e}(k) \rightarrow 0$  cuando  $k \rightarrow \infty$  si se define de la siguiente manera:

$$\alpha_p(k) = 1 / [1 + \sum_{i=1}^h \sum_{q=1}^n \beta_{aipq} \gamma_q(k-i-r)^2 + \sum_{i=1}^f \sum_{q=1}^n \beta_{bipq} u_q(k-i-r)^2 + \sum_{i=1}^g \sum_{q=1}^m \beta_{cipq} w_q(k-i-r)^2] \quad (p=1, n) \quad (6)$$

Cuando el SCAP se comporta únicamente según su acción de identificación solo necesitará realizar las operaciones previamente especificadas.

- e) Cálculo del vector salida deseada  $\underline{d}_1(k+r+1)$  por medio del bloque de consigna, cuyo diseño será tratado en el apartado II.6.
- f) Cálculo del vector de mando por el bloque de control, en la forma que

se especifica a continuación.

A partir del modelo adaptativo-predictivo ajustado previamente en la operación d), la estimación en el instante  $k$  de la salida del proceso en el instante  $k+r+1$ ,  $\underline{d}'_1(k+r+1)$ , dependerá de la entrada del proceso  $\underline{u}(k)$  y será definida por la ecuación:

$$\underline{d}'_1(k+r+1) = \sum_{i=1}^h \hat{A}_i(k) \underline{y}(k+1-i) + \sum_{i=1}^f \hat{B}_i(k) \underline{u}(k+1-i) + \sum_{i=1}^g \hat{C}_i(k) \underline{w}(k+1-i) \quad (7)$$

Debido a que deseamos que la salida del proceso en el instante  $k-r-1$  sea igual a la salida deseada  $\underline{d}_1(k+r+1)$ , sustituiremos en (7) el valor estimado  $\underline{d}'_1(k+r+1)$  por  $\underline{d}_1(k+r+1)$  y, en consecuencia,  $\underline{u}(k)$  será calculado de acuerdo con la ecuación:

$$\underline{u}(k) = \hat{B}_1^{-1}(k) \underline{d}_1(k+1+r) - \hat{B}_1^{-1}(k) \sum_{i=2}^f \hat{B}_i(k) \underline{u}(k+1-i) - \hat{B}_1^{-1}(k) \sum_{i=1}^h \hat{A}_i(k) \underline{y}(k+1-i) - \hat{B}_1^{-1}(k) \sum_{i=1}^g \hat{C}_i(k) \underline{w}(k+1-i) \quad (8)$$

g) Aplicación del vector de control calculado al proceso.

#### II.4 ESTABILIDAD ASINTOTICA DEL SCAP

Este apartado precisará bajo que condiciones el SCAP puede, desde el punto de vista matemático, ser aplicado satisfactoriamente y cual es la razón formal de la secuencia de operaciones descrita en el apartado anterior.

Consideraremos que la relación entre las entradas y salidas del proceso puede ser descrita por la siguiente ecuación:

$$\underline{y}(k) = \sum_{i=1}^h A_i(k) \underline{y}(k-i-r) + \sum_{i=1}^f B_i(k) \underline{u}(k-i-r) + \sum_{i=1}^g C_i(k) \underline{w}(k-i-r) \quad (9)$$

Donde  $A_i(k)$ ,  $B_i(k)$  y  $C_i(k)$  son matrices reales de apropiadas dimensiones, con un número finito de cambios acotados en sus valores cuando  $k \rightarrow \infty$ . El mínimo retardo puro entre una entrada y una salida es de  $r$  periodos de muestreo y se supone que la matriz  $B_1(k)$  en ningún momento es singular.

La diferencia entre la salida del proceso y la salida deseada definirá el vector error de control:

$$\underline{e}_1(k) = \underline{y}(k) - \underline{d}_1(k) \quad (10)$$

A continuación enunciaremos un teorema cuya demostración puede encontrarse en [28], y para la cual se utilizan las dos proposiciones siguientes:

Proposición 1: La salida deseada y el vector de perturbaciones permanecerán siempre acotados.

Proposición 2: La matriz  $\tilde{B}_1(k)$  en ningún momento es singular. La justificación de esta proposición es asimismo tratada en [28].

Teorema: El sistema de identificación definido por las ecuaciones (9) y (1) a (6) es asintóticamente hiperestable (\*). Esta característica del sistema de identificación implica la estabilidad asintótica del sistema de control definido por las ecuaciones (9), (1) a (6), (8) y (10).

Este teorema expresa de manera matemática formal la característica que define al SCAP, que es la siguiente:

El SCAP es asintóticamente estable. El error de control  $e_1(k)$  es una medida del alejamiento del Sistema de su punto de equilibrio (en el cual  $e_1(k) = 0$ ). Si por cualquier razón, tal como la acción de las perturbaciones ó la variación de los parámetros del proceso, el Sistema es desplazado de su equilibrio ( $e_1(k) \neq 0$ ), el Sistema reacciona apropiadamente con el fin de alcanzar su equilibrio de nuevo; es decir  $e_1(k) \rightarrow 0$  en todo momento y en consecuencia  $y(k) \rightarrow d_1(k)$ .

Esta propiedad de estabilidad asintótica hace que el SCAP actúe de acuerdo con los objetivos según los cuales había sido concebido:

Hemos tratado de encontrar un bloque de control adaptativo, que solo utilice la información que le aporten las entradas y salidas del proceso, y que se comporte como el modelo exactamente inverso al mismo. De esta forma la salida del bloque de control será igual a la entrada del proceso, y la salida del proceso seguirá a la entrada del bloque de control, que será igual a la salida deseada para el proceso.

## II.5 GENERALIDAD DE LA SOLUCION

Cualquier proceso lineal multivariable, con parámetros variables con el tiempo y con retardos puros, puede ser transformado, añadiendo tantos retardos como sean necesarios a sus entradas y salidas, a una forma tal como la de la ecuación:

(\* Nota.- Los sistemas hiperestables son un subconjunto de los sistemas estables.

$$\underline{y}(k) = \sum_{i=1}^h A_i(k) \underline{y}(k-i-r) + \sum_{i=1}^f B_i(k) \underline{u}(k-i-r) + \sum_{i=1}^g C_i(k) \underline{w}(k-i-r_1) \quad (9a)$$

Una característica de la mencionada transformación es que si el sistema resultante puede ser controlado, el sistema original también puede serlo.

En consecuencia, el método puede ser aplicado a cualquier proceso lineal multivariable, con parámetros variables con el tiempo y con retardos puros, con tal de que en la ecuación (9a) la matriz  $B_1(k)$  no sea singular y  $r_1 \geq r$ .

## II.6 DISEÑO DEL BLOQUE DE CONSIGNA.

El bloque de consigna deberá producir la salida deseada teniendo en cuenta la realizabilidad física de la misma, así como la dinámica y las especificaciones deseadas.

El diseño de este bloque adquiere especial importancia en el control de procesos a defasaje no mínimo, es decir, procesos cuyos inversos son inestables, porque en este caso para que el proceso pudiera seguir determinadas salidas deseadas el vector de control requerido debería tender hacia infinito.

Hemos considerado una solución general al problema en cuestión de acuerdo con la siguiente filosofía:

El modelo adaptativo-predictivo utilizado por el SCAP puede predecir la trayectoria de salida del proceso como función de una secuencia de entradas al proceso. El diseño adaptativo del bloque de consigna puede elegir, en cada instante de muestreo, la deseada trayectoria de salida que minimiza un cierto índice. Este índice puede ser una función de las secuencias de entrada y salida predichas y de la dinámica deseada.

A continuación presentaremos un diseño del bloque de consigna, para procesos a defasaje mínimo, que corresponde al de un modelo de referencia, en el cual sus pasados vectores de salida son sustituidos por los pasados vectores de salida del proceso. En consecuencia la salida deseada será generada por la ecuación:

$$\underline{d}_1(k+1+r) = \sum_{i=1}^t F_i \underline{y}(k+1-i) + \sum_{j=1}^s H_j \underline{v}(h+1-j) \quad (11)$$

Donde  $\underline{y}(k+1-i)$  y  $\underline{v}(k+1-j)$  son los vectores de salida del proceso y entrada del bloque de consigna, en los instantes  $k+1-i$  y  $k+1-j$ , respectivamente. Las matrices  $F_i$  ( $i = 1, t$ ) y  $H_j$  ( $j = 1, s$ ) son las mismas que las del modelo de referencia considerado y definen la dinámica deseada.

Para asegurar la estabilidad del conjunto del sistema de control, incluyendo el bloque de consigna, la única condición que exige el diseño presentado, es que los parámetros del bloque de consigna correspondan a los de un modelo de referencia estable.

Esta afirmación puede deducirse del hecho de que el sistema de control, compuesto por bloque de control, proceso y mecanismo de adaptación, tiende a una matriz de transferencia diagonal unitaria cuando  $k \rightarrow \infty$ . En consecuencia, la salida del proceso tiende a la salida del bloque de consigna y, por lo tanto, el bloque de consigna, y el conjunto del sistema de control, tienden a comportarse con la dinámica del mencionado modelo.

Consideremos que la ganancia estática de dicho modelo es la unidad. El diseño del bloque de consigna corresponde a la siguiente concepción práctica:

La entrada del bloque de consigna será igual a la permanente salida deseada para el proceso, mientras que la salida del bloque de consigna será igual a la dinámica salida deseada para el proceso. Dicha dinámica salida deseada, o simplemente salida deseada, tendrá de esta forma en cuenta las previas salidas del proceso y la dinámica deseada.

Acabaremos diciendo que el diseño del bloque de consigna presentado tiene las siguientes características:

- 1.- Es aplicable a procesos multivariables a defasaje mínimo.
- 2.- Es simple.
- 3.- Asegura la estabilidad del conjunto del sistema de control.
- 4.- La salida deseada esta asociada a su realizabilidad física.
- 5.- Tiene en cuenta en tiempo real las perturbaciones que pueden actuar sobre el proceso.
- 6.- Reduce el error inducido por el ruido de medida en el cálculo de la señal de control (\*).

## II.7 DIFERENCIA DE ESTRUCTURAS Y PRESENCIA DE PERTURBACIONES

Para que el SCAP tienda a su punto de equilibrio, las matrices del bloque de control  $\tilde{A}_i(k)$ ,  $\tilde{B}_i(k)$  y  $\tilde{C}_i(k)$  no deben necesariamente tender a ser iguales a las matrices del proceso  $A_i(k)$ ,  $B_i(k)$  y  $C_i(k)$ , sino que, en general, tenderán a una representación equivalente de dichas matrices con respecto a las entradas y salidas del proceso.

(\*) Nota.- Esta característica es especialmente importante en la circunstancia crítica en que el periodo de muestreo es muy pequeño en relación con la constante de tiempo más significativa del proceso / /.

La equivalencia previamente considerada depende de la ortogonalidad entre el error matricial de identificación y el vector compuesto por las entradas y salidas del proceso [25]. Cuando el contenido frecuencial de este vector [23], permite que la ortogonalidad considerada se verifique, la equivalencia mencionada puede producirse aún en presencia de una diferencia de estructuras entre el modelo que rige el comportamiento del bloque de control y el que rige el comportamiento del proceso. Experimentalmente el SCAP ha demostrado que siempre tiende a alcanzar, o alcanza, su equilibrio a pesar de que exista la mencionada diferencia de estructuras.

Como ha sido considerado teóricamente, cuando las perturbaciones que pueden actuar sobre el proceso son medibles, el SCAP puede utilizar este conocimiento para mantener su equilibrio. Asimismo, el diseño del bloque de consigna presentado reduce considerablemente el efecto del ruido de medida sobre el rendimiento del sistema de control. En cualquier caso, las perturbaciones y ruidos no medibles que pueden actuar sobre el sistema tienden a desplazarlo de su equilibrio y, en consecuencia, actuarán en detrimento del control. Sin embargo, dadas sus propiedades de estabilidad, el SCAP tiende a volver a su equilibrio constantemente.

En el capítulo siguiente se mostrará experimentalmente el satisfactorio rendimiento del SCAP en presencia de un alto nivel de perturbaciones.

## II.8 COMPARACION CON OTROS METODOS Y RESPUESTA A LOS IMPORTANTES PROBLEMAS PLANTEADOS EN EL CONTROL DE PROCESOS

El objeto de este apartado es señalar las diferencias conceptuales que existen entre los métodos de control actualmente conocidos, considerados en el capítulo I, y el SCAP. Para ello consideraremos las aportaciones introducidas por el Método Adaptativo-Predictivo en los siguientes aspectos:

- 1.- Características del diseño.
- 2.- Respuesta a los problemas teóricos planteados.
- 3.- Características de aplicabilidad.

Cada uno de estos aspectos será considerado separadamente a continuación:

### 1. Características del diseño.

Con relación al diseño, las características generales del SCAP son las siguientes:

- a) *Tiene una notable generalidad, dado que está diseñado para procesos lineales con parámetros variables con el tiempo, con ó sin retardos puros e incluye en su formulación las perturbaciones medibles que pueden actuar sobre el proceso.*
- b) *El diseño está basado en un criterio de estabilidad asintótica, que asegura al conjunto del sistema de control dicha característica, incluso si el proceso es inestable.*
- c) *Introduce los nuevos conceptos de bloque de consigna y salida deseada. El índice de rendimiento deseado del SCAP es una trayectoria dinámica, llamada salida deseada en relación a su significado físico y generada por el bloque de consigna. A diferencia de los sistemas adaptativos con modelo de referencia (S. A. M. R.), la salida deseada no es necesariamente la de un modelo de referencia, lo que permite, entre otras ventajas, adaptarla a las perturbaciones que puedan actuar sobre el Sistema.*
- d) *Cuando el SCAP alcanza su estado de equilibrio la salida del proceso es igual a la salida deseada; cuando esta alejado de él, la salida del proceso se aproxima a la salida deseada a medida que el Sistema se acerca a su equilibrio.*

## 2. Respuesta a los problemas teóricos planteados

*El SCAP da una respuesta matemáticamente argumentada a los importantes problemas señalados en el capítulo anterior:*

- a) *Problema de la diferencia de estructuras. - Como ha sido considerado en el apartado II.7, el SCAP para alcanzar su equilibrio no necesita de una identificación completa del proceso, sino únicamente de una "identificación con vistas al control" en tiempo real. Por ello el mando del proceso puede ser llevado a cabo satisfactoriamente con una estructura de control de orden inferior a la del proceso en cuestión.*
- b) *Problema de la variación de los parámetros. - Desde el punto de vista teórico el SCAP está diseñado para ser aplicado a procesos lineales con parámetros variables con el tiempo. La experiencia adquirida en las aplicaciones realizadas ha confirmado que este Sistema puede ser aplicado a procesos completamente no lineales.*

## 3. Características de Aplicabilidad

*Entre otras, las características de mayor relieve en la aplicación práctica*

del Método son las siguientes:

- a) *No se requiere un conocimiento previo de los parámetros del proceso para la aplicación del sistema.*
- b) *El criterio de control es la salida deseada para el proceso y su significado físico es obvio.*
- c) *El Método puede aplicarse utilizando valores incrementales de los vectores de entrada, salida y perturbaciones.*
- d) *Se pueden imponer con gran flexibilidad límites apropiados al vector de mando sin afectar la estabilidad del Sistema de control, dado que esta depende de la estabilidad del sistema de identificación.*
- e) *El conocimiento de algunos de los parámetros del proceso puede ser utilizado en la aplicación del SCAP.*

*A estas características del SCAP, cabe añadir la de su simplicidad de cálculos.*

*Podemos resumir diciendo que el Método Adaptativo-Predictivo presenta en los aspectos conceptuales, de diseño y aplicabilidad, diferencias fundamentales con los sistemas de control hasta ahora desarrolladas y da una respuesta a los importantes problemas que la Moderna Teoría de Control no ha podido resolver.*

## II.9 CONCLUSIONES

*Una solución general al control de procesos lineales multivariables, con parámetros desconocidos y variables con el tiempo, y con retardos puros, ha sido breve y conceptualmente presentada.*

*Una de las características más significativas de esta solución es que muestra y utiliza la equivalencia entre los problemas de predicción y control. De esta forma, el control es calculado de tal manera que la salida deseada para el proceso coincide con la predicha.*

*Las principales conclusiones del resumen realizado en este capítulo se exponen a continuación:*

- 1.- *El método utiliza únicamente la información que le aportan las entradas y las salidas del proceso, en consecuencia, una estimación del estado del mismo no es necesaria.*
- 2.- *No requiere el conocimiento del valor de los parámetros del proceso o de su evolución con el tiempo, únicamente el valor aproximado de sus retardos, que generalmente es conocido. Si se dispone del valor de alguno de los parámetros del proceso, estos pueden ser utilizados*

*para simplificar las operaciones de control.*

- 3.- *El sistema de identificación es asintóticamente hiperestable e implica la estabilidad asintótica del sistema de control.*
- 4.- *Introduce los nuevos conceptos de bloque de consigna y de salida deseada. Este último da un significado obviamente físico al criterio de control.*
- 5.- *Cuando el SCAP alcanza su equilibrio, la salida del proceso es igual a la salida deseada.*
- 6.- *Cuando las perturbaciones, que actúan sobre el proceso, pueden ser medidas o predichas, el SCAP puede utilizar este conocimiento para mantener su equilibrio (Feedforward Compensation).*
- 7.- *El Método da una respuesta satisfactoria y matemáticamente argumentada a los importantes problemas de la diferencia de estructuras y de la variación de parámetros.*

*El siguiente capítulo presentará un resumen de las aplicaciones experimentales realizadas hasta ahora en los dominios industrial y aeroespacial, utilizando el SCAP.*

*CAPITULO III.- RECIENTES REALIZACIONES DEL CONTROL  
ADAPTATIVO-PREDICTIVO EN LOS DOMINIOS  
INDUSTRIAL Y AEROESPACIAL*

*Resumen*

*En este capítulo se presentan brevemente los dos proyectos de control de mayor relieve llevados a cabo hasta ahora utilizando el Método Adaptativo-Predictivo, a saber: El diseño y evaluación de un piloto automático para el control del ángulo de elevación del avión supersónico F-8, y el control multivariable de una columna de destilación binaria. Los procesos correspondientes fueron elegidos porque pueden ser considerados ejemplos clásicos de las dificultades más importantes que la Moderna Teoría de Control encuentra en sus aplicaciones prácticas; dificultades a las cuales el Método utilizado da una respuesta teórica. Los resultados obtenidos confirmaron el excelente rendimiento que la teoría permite augurar, a pesar de las duras condiciones a las que el Sistema de Control Adaptativo-Predictivo (SCAP) fue sometido.*

### III.1 INTRODUCCION.

*El estado actual de la Teoría de Control y la naturaleza de los problemas prácticos en el control de procesos industriales, ha sido tema discutido frecuentemente en los últimos años [15,17,47].*

*La Teoría de Control Optimo, matemáticamente rica y bien estructurada es el resultado de un gran esfuerzo de investigación, pero especialistas prácticos y algún teórico [15] han puesto de relieve el vacío existente entre teoría y práctica. Aunque se han obtenido algunos resultados prácticos utilizando modernas teorías de control adaptativo [1 ;41], el estado actual de estas teorías no puede salvar el mencionado vacío por las razones que expondremos a continuación:*

*La mayor parte de los problemas industriales exigen del sistema de control que verifique, en parte o en su totalidad, los requisitos siguientes:*

- 1.- Basar el diseño en un conocimiento del proceso limitado e inexacto.*
- 2.- Utilizar únicamente la medida de salidas y entradas del proceso.*
- 3.- Asegurar la estabilidad del conjunto del sistema de control.*
- 4.- Tomar en consideración la no linealidad y / o la variación de los parámetros del proceso con el tiempo.*
- 5.- Ser aplicable a procesos con retardos puros.*
- 6.- Resolver el problema de mando con una estructura de control basada en un modelo del proceso de orden inferior.*
- 7.- Utilizar las interacciones inherentes en los procesos multivariables para obtener el deseado control.*
- 8.- Tener un índice de rendimiento significativo y fácil de definir.*
- 9.- Tomar en consideración las limitaciones propias de las variables de control.*
- 10.- Ser simple de aplicar, aceptable para el operador humano y, eventualmente, integrable con previos controles existentes en el proceso.*

*La solución al problema de control que aporta el SCAP permite una formulación matemática general y conceptual de todos los requisitos previamente enumerados. Tomando en cuenta esta consideración los proyectos elegidos, durante un programa de investigación de dos años de duración [28], para la aplicación práctica del Método han sido:*

- 1º - Control de las características longitudinales (ángulo de elevación) del avión supersónico F-8.*
- 2º - Control mono y multivariable de una columna de destilación binaria.*

La Moderna Teoría de Control encuentra las dificultades más importantes de acuerdo con los requisitos previamente señalados, en el control de los siguientes tipos de procesos:

- a) Procesos altamente no lineales.
- b) Procesos con retardos puros.
- c) Procesos multivariables con importantes interacciones.
- d) Procesos inestables.

El primer proceso considerado en la realización del mencionado Programa, el avión supersónico F-8, corresponde plenamente a la categoría de procesos a) previamente considerada. Además la simulación de alta fidelidad en la que se basó el proyecto fue preparada para probar el SCAP cuando el avión es inestable con respecto a sus características longitudinales, es decir cuando corresponde a las categorías a) y d) antes mencionadas.

La columna de destilación, por su parte, es un proceso que pertenece a las categorías a), b) y c) consideradas. Su control mono y multivariable nos ha permitido probar el SCAP en estas circunstancias.

Así pues, el interés de la elección radica en que las características de los procesos considerados permiten abordar directamente los principales problemas de control, hasta ahora no resueltos. Estos procesos han venido siendo ejemplos clásicos en la literatura de control, [19,47], para poner de relieve la complejidad de los problemas existentes y la ausencia de soluciones adecuadas.

### III.2 DISEÑO Y EVALUACION DE UN PILOTO AUTOMATICO PARA EL CONTROL DE LAS CARACTERISTICAS LONGITUDINALES DEL AVION SUPERSONICO F-8

#### III.2.1 Interés y Objetivo del Control Dinámico del Angulo de Elevación de un Avión

Consideraciones de estabilidad requieren que en el diseño de aviones, hasta ahora realizado, el centro de gravedad se sitúe entre el centro aerodinámico o de sustentación y el elevador. El momento originado por la fuerza ascensional, aplicada en el centro aerodinámico, y el peso, aplicado en el centro de gravedad, es compensado por el momento creado por la posición del elevador.

La estabilidad así obtenida se debe a un incremento de la resistencia del aire al movimiento del avión. Para cada condición de vuelo estable, a un determinado angulo de elevación corresponde una cierta posición del elevador. Si la posición del elevador es desplazada de la de equilibrio, los momentos previamente men-

cionados se descompensarán y el avión iniciará un cambio de su ángulo de elevación.

*El interés de un perfecto control del ángulo de elevación es básico ya que, entre otras razones, permitirá un excelente control de la altitud.*

*Sin entrar en mayores detalles diremos que, hasta ahora, el control dinámico del ángulo de elevación se ha venido realizando a través del mando manual, desde el timón, de la posición del elevador. De esta forma, en la práctica, o bien se puede obtener un cambio del ángulo de elevación lento y con pocas oscilaciones o un cambio rápido pero con oscilaciones considerables.*

*El objetivo del sistema de control "ideal" sería el de obtener un cambio rápido y sin oscilaciones del ángulo de elevación.*

### III.2.2 Trabajos Previos en esta Area

*La mayor dificultad que ha encontrado la aplicación de sistemas de control a la dinámica longitudinal de aviones, consiste en la rápida variación de los parámetros del proceso durante operaciones normales de vuelo.*

*En unas determinadas condiciones de vuelo, los sistemas de control lineal para el seguimiento de un modelo ( " Linear Model Following Control ", LMFC ), /14,44/, pueden lograr que el comportamiento del avión sea conforme a la dinámica de un modelo lineal preestablecido. Sin embargo el rendimiento de los LMFC es satisfactorio solo si los parámetros del avión son exactamente conocidos o si sus valores difieren ligeramente de los nominales.*

*La técnica de los sistemas adaptativos con modelo de referencia (SAMR) ha sido utilizada para mejorar el rendimiento de los LMFC en /19/. Dificultades prácticas surgen debidas a que la aplicación de este sistema requiere un cierto conocimiento de los parámetros y variables de estado del avión.*

*El método del gradiente ha sido utilizado para identificar algunos de los parámetros asociados a un sistema de control adaptativo de la aceleración normal en un vehículo aeroespacial /31,42/. En general, aunque la respuesta permanente pueda ser satisfactoria, errores de identificación alejarán el comportamiento del vehículo de la dinámica deseada.*

*A continuación presentaremos, en forma resumida, la aplicación del Método Adaptativo-Predictivo a la mecanización de un piloto automático para el control de las características longitudinales del avión supersónico F-8.*

### III.2.3 Enfoque del Diseño y Objetivo del Proyecto

La teoría aplicada nos permite considerar globalmente el problema de control y resolverlo de acuerdo con las siguientes circunstancias:

- a) No se requiere un conocimiento previo de las características dinámicas del avión ó de sus variaciones con el tiempo. Únicamente debe darse al modelo adaptativo-predictivo un orden lógico para optimizar su rendimiento.
- b) La información externa utilizada por el piloto automático es la proporcionada por las medidas de la velocidad angular de elevación, considerada como salida del proceso. La entrada al mismo es el ángulo de posición del elevador.
- c) El movimiento del avión seguirá a la salida deseada.
- d) El piloto automático se adapta a las diferentes condiciones en el curso de cualquier clase de operaciones de vuelo.

El objetivo del proyecto puede ser explicado basicamente en los siguientes puntos:

- 1- Cuando el piloto humano desplace el timón de su posición de equilibrio, el avión empezará a variar su ángulo de elevación con una velocidad aproximadamente proporcional al desplazamiento mencionado.
- 2- Cuando el piloto humano libera el timón y este vuelve a su posición de equilibrio, el avión cesará su variación de ángulo de elevación sin oscilaciones.

De esta forma el piloto humano podrá controlar a voluntad el ángulo de elevación de acuerdo con el objetivo de control expuesto en III.2.1.

### III.2.4 Experimentos y Resultados

La eficacia del piloto automático fue probada ampliamente utilizando la simulación híbrida, no lineal y de alta fidelidad del avión de que dispone el Charles Stark Draper Laboratory, Cambridge, Massachusetts (U.S.A.). En este apartado nos limitaremos a presentar dos experimentos que conciernen a su comportamiento adaptativo, y un tercero que muestra su eficacia incluso cuando se provoca la inestabilidad inherente del avión.

En las figuras pueden observarse oscilaciones en la salida deseada. Ello es debido al diseño del bloque de consigna utilizado para generar la salida deseada /28/. Debe tenerse en cuenta que la salida deseada no es la salida de un modelo de referencia.

### III.2.4a Comportamiento Adaptativo del Piloto Automático

De entre los experimentos que fueron realizados para probar el comportamiento adaptativo del piloto automático, mostraremos dos que se llevaron a cabo en las siguientes circunstancias:

- La frecuencia de muestreo era 20 Hz.
- Los parámetros del modelo adaptativo-predictivo fueron inicializados con los mismos valores, cuya elección fue razonable.
- A partir del equilibrio en cada una de las condiciones de vuelo consideradas, el timón es desplazado automáticamente 1.33 grados de su posición de equilibrio durante 5 segundos.

Los resultados de los dos experimentos aludidos son mostrados en las figuras III.1 y III.2. En dichas figuras son indicadas las condiciones de vuelo respectivas; y en ellas la repuesta natural del avión, es decir, su comportamiento sin piloto automático es mostrado en la parte izquierda, mientras que el comportamiento con piloto automático es mostrado en la derecha.

### III.2.4b Control del Avión Inherentemente Inestable

La figura III.3 muestra una parte del vuelo del avión controlado por el piloto automático cuando el centro de gravedad ha sido desplazado desde su posición nominal (- 10% LMA (\*)), hasta una posición que deja el centro aerodinámico entre el centro de gravedad y el elevador (aproximadamente - 5% LMA). En estas condiciones el avión es inherentemente inestable sin el funcionamiento del piloto automático (\*\*).

La figura indica las condiciones de vuelo en que los cambios de la posición del ángulo de elevación se realizan. La frecuencia de muestreo era de 10 Hz.

Las oscilaciones de la salida deseada, producidas por el diseño del bloque de consigna, eran, en este caso, acentuadas por la inestabilidad inherente del avión. Sin embargo estas oscilaciones tienen un efecto positivo, en el sentido de que sensibilizan el proceso de identificación de los parámetros del modelo adaptativo-predictivo.

### III.2.5 Análisis Resumido de los Resultados Obtenidos con el Piloto Automático

Resumiremos en este apartado las conclusiones que se deducen de los expe-

(\*) Nota.- LMA son las iniciales de longitud medida de ala, y esta distancia está referida al centro de sustentación, considerando que la posición del elevador define el sentido positivo.

(\*\*) Nota.- El piloto automático hace que el avión, a pesar de su inestabilidad, se comporte respondiendo a los deseos del piloto humano, el cual gobierna el avión de acuerdo con el objetivo expuesto en III.2.3.

CONDICIONES DE VUELO : H = 9.144 m  
 NUMERO MACH = 1.2

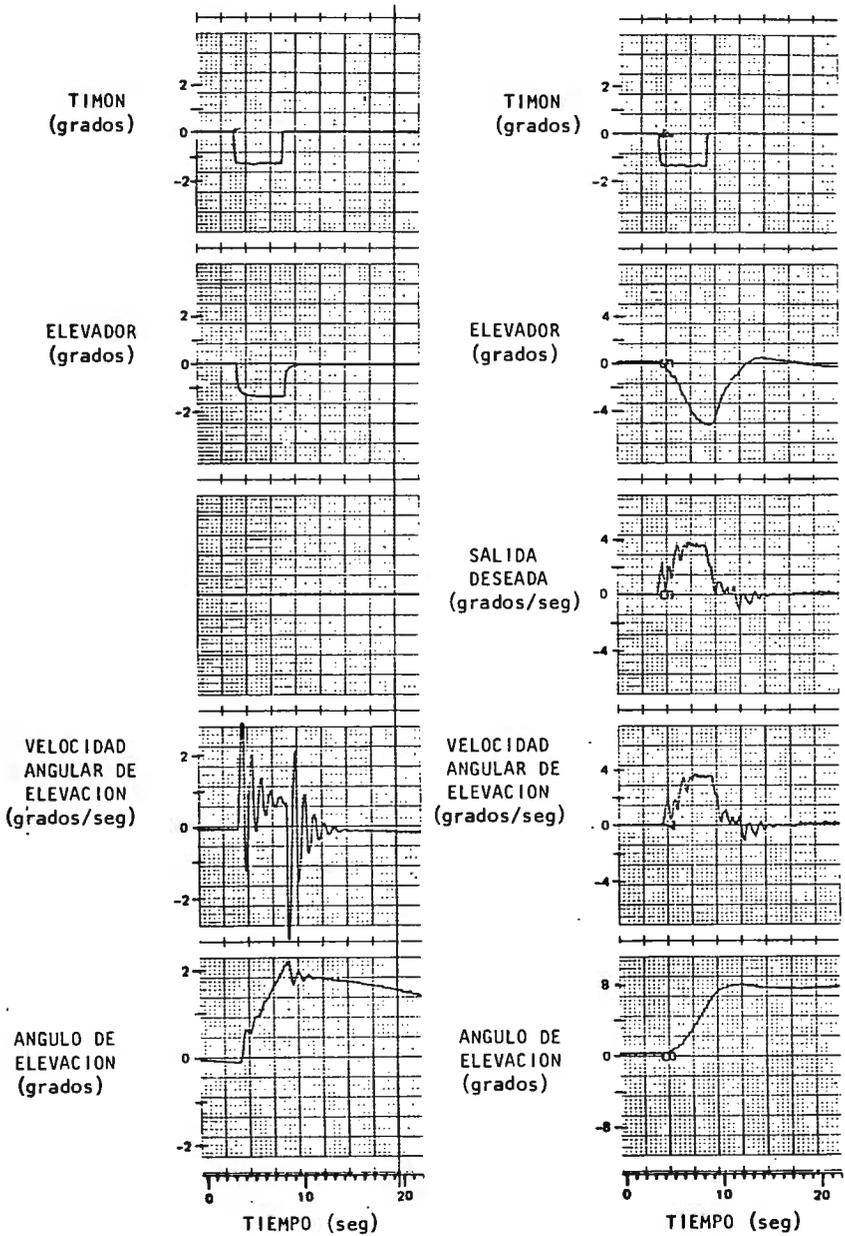


FIGURA III.1 - COMPORTAMIENTO ADAPTATIVO DEL PILOTO AUTOMATICO  
 PRIMERA EXPERIENCIA

CONDICIONES DE VUELO:  $H = 9.144 \text{ m}$   
NUMERO DE MACH = 0.5

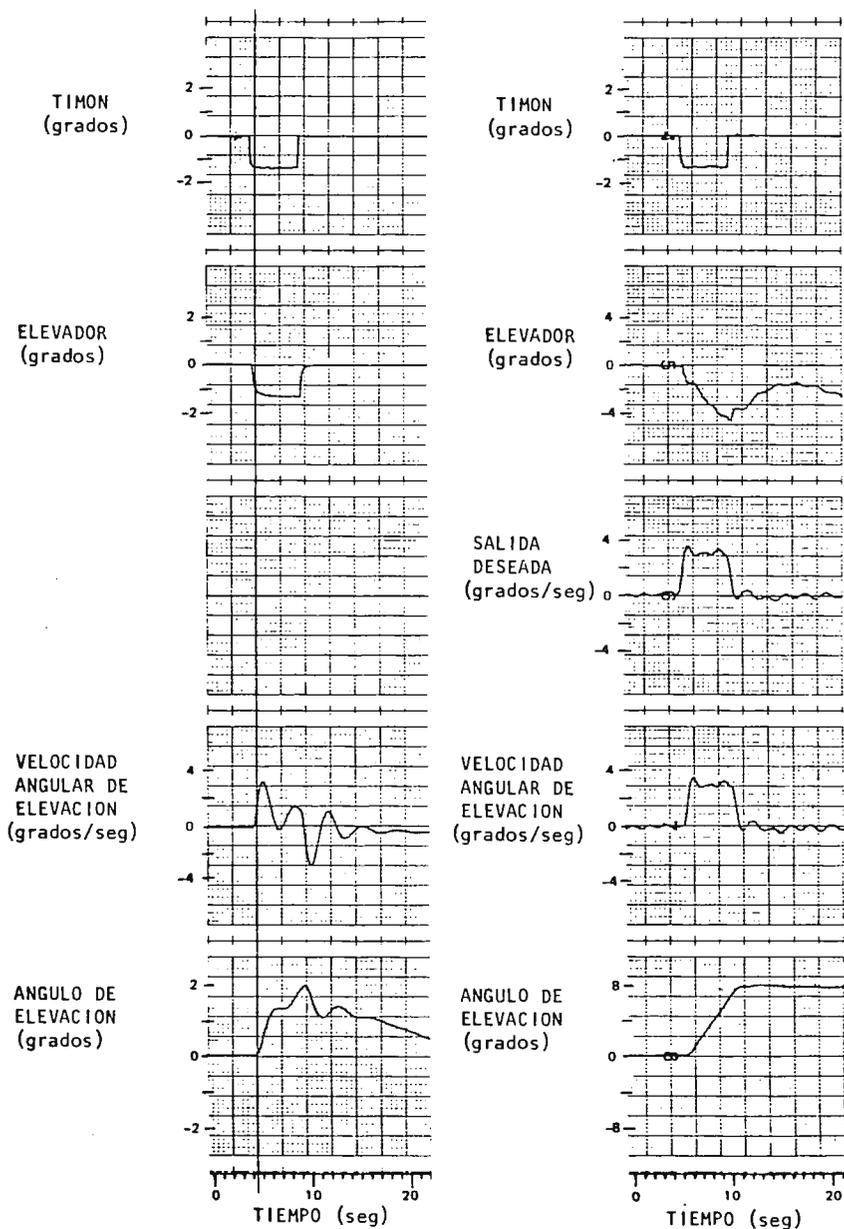


FIGURA III.2 - COMPORTAMIENTO ADAPTATIVO. SEGUNDA EXPERIENCIA

1 - CONDICIONES DE VUELO :  $H = 3.048 \text{ m}$   
NUMERO DE MACH = 0.4

2 - CONDICIONES DE VUELO :  $H = 762 \text{ m}$   
NUMERO DE MACH = 0.74

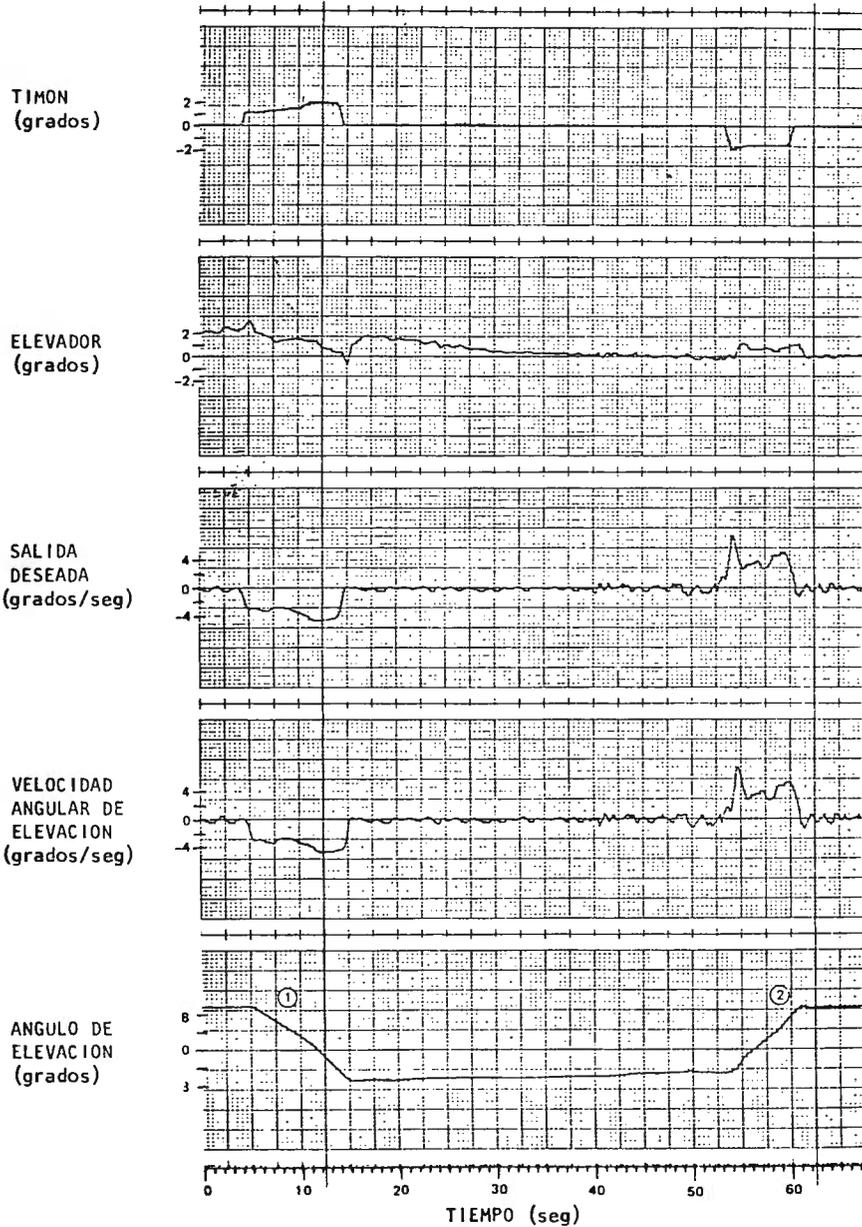


FIGURA III.3 - CONTROL DEL AVION INHERENTEMENTE INESTABLE

rimentos y resultados globales obtenidos en la aplicación del piloto automático en cuestión [28]. Este análisis tendrá en cuenta los siguientes principales aspectos:

- a) Control del avión estable.
- b) Identificación de parámetros.
- c) Control del avión inestable.

a) Control del avión estable

En todos los experimentos realizados el piloto automático conservó su estabilidad y, a pesar de las ampliamente diferentes condiciones de vuelo, las respuestas en ángulo de elevación fueron excelentes y prácticamente idénticas.

Un análisis detenido lleva a considerar asimismo las siguientes características de la aplicación:

- 1- El avión supersónico F-8 es básicamente un proceso no lineal. Para constatarlo basta comparar las respuestas naturales del avión mostradas en las figuras III.1 y III.2.
- 2- La velocidad angular de elevación sigue fielmente a la salida deseada generada por el bloque de consigna.
- 3- El control del ángulo de elevación del avión para ser extremadamente fácil para el piloto humano de acuerdo con el objetivo del proyecto considerado en III.2.3.
- 4- El piloto automático conserva su deseado comportamiento en cualquier clase de operaciones de vuelo.

b) Identificación de parámetros

- 1- No es requerido un conocimiento a priori de los parámetros del avión. En cada experimento los parámetros del bloque de mando han sido inicializados con los mismos valores, que han sido elegidos de una forma razonable.
- 2- Los parámetros del modelo adaptativo-predictivo realizan una identificación con vistas al control y la variación de sus valores es consecuente con la alta no linealidad del avión.
- 3- El modelo adaptativo-predictivo puede utilizar estructuras de diferentes ordenes con resultados igualmente satisfactorios.

c) Control del avión inestable

Los resultados obtenidos cuando se provoca la inestabilidad del avión, nos llevan a las siguientes conclusiones:

- 1- El Método Adaptativo-Predictivo ha demostrado de acuerdo con la teoría ser capaz de controlar procesos inestables.
- 2- El Sistema de control se adapta automáticamente a las nuevas características del avión conservando su deseado comportamiento dinámico.
- 3- La influencia de los sistemas de control en los futuros diseños de aviones será considerable. La resistencia del aire al movimiento del avión disminuirá significativamente si en el diseño del mismo se hace coincidir el centro de gravedad con el de sustentación. El SCAP abre la posibilidad del mencionado diseño, porque resuelve el problema de estabilidad. Este tipo de sistema de control tendrá gran influencia en el diseño de procesos y considerables beneficios económicos son susceptibles de ser realizados. Concretamente en aviación un notable porcentaje de combustible puede ser ahorrado.

### III. 3 CONTROL MONO Y MULTIVARIABLE DE UNA COLUMNA DE DESTILACION

#### III. 3. 1 Equipo Experimental

Un diagrama esquemático del equipo experimental, que se encuentra en el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Alberta, Edmonton, (Canada), y que ha sido empleado en éste y en anteriores estudios [39, 45, 46 ], aparece en la figura III. 4 y es brevemente descrito a continuación.

#### III. 3. 1a Descripción del Proceso

La columna es de 22, 86 cm. de diámetro y contiene 8 platos de borboteo, con una separación entre ellos de 30, 48 cm. El dispositivo de transferencia calorífica que calienta la base, es del tipo termosifón y el producto de la parte superior de la columna es recogido en un condensador. La columna opera a la presión atmosférica. Una disolución de metanol y agua, con un 46% en peso de metanol alimenta la columna a la altura del cuarto plato. La Tabla III. 1 presenta condiciones típicas de funcionamiento de la columna.

T A B L A III. 1

Caudal de alimentación ... 18, 0 g/s	Caudal de producto en la base ..... 8, 9 g/s
Caudal de reflujo ..... 18, 1 g/s	Caudal de producto en la parte superior ..... 9, 1 g/s
Caudal de vapor ..... 15, 5 g/s	Composición de la alimentación ..... 45, 7 %

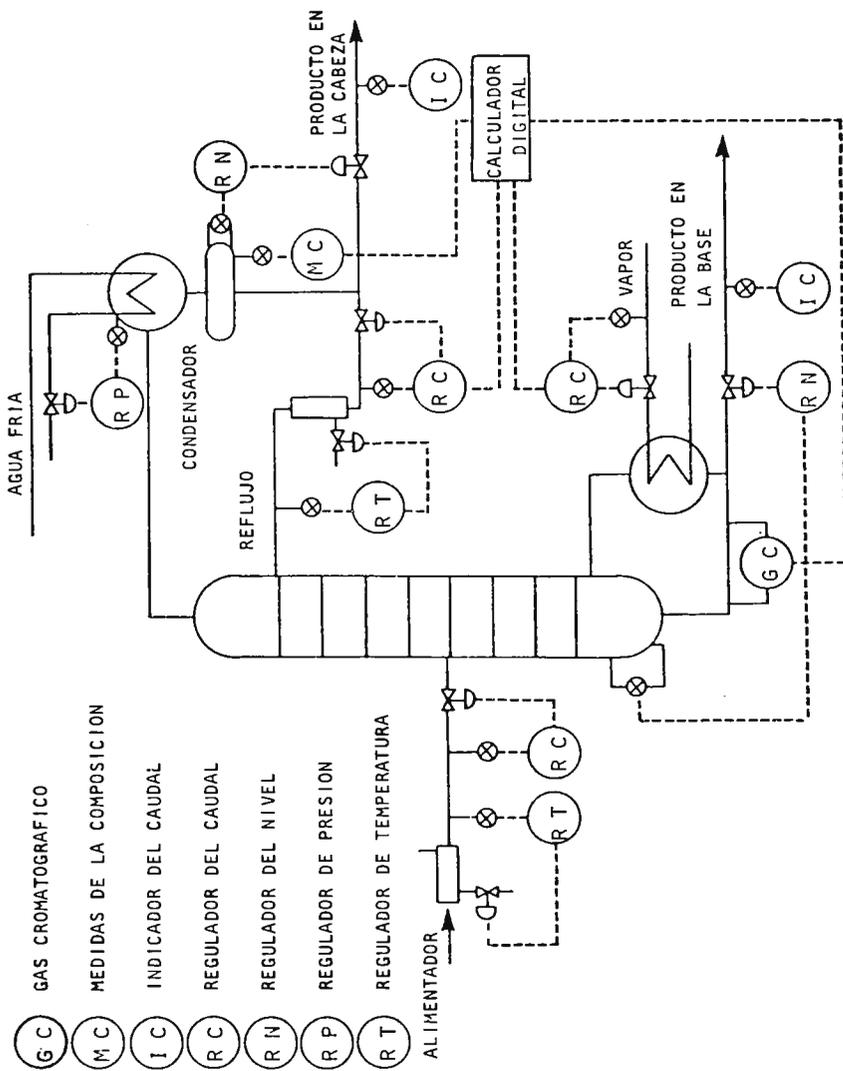


FIGURA III.4 - COLUMNA DE DESTILACION Y CADENAS DE CONTROL

Composición del producto en el condensador . . . . .	96% en peso	Temperatura de la alimen- tación . . . . .	71, 8°C
Composición del producto en la base . . . . .	1, 1% en peso	Temperatura del reflu- jo . . . . .	63, 9°C

### III. 3. 1b Medida de las Composiciones

Una célula de capacidad realizó continuas medidas de la composición del producto en la cabeza de la columna. Este método es adecuado para disoluciones con alto contenido en metanol, sin embargo da resultados muy erróneos para bajas concentraciones del mencionado componente. En consecuencia para la medida de la composición del producto en la base se ha utilizado un sistema industrial Bechman 4, denominado gas cromatográfico ( GC ).

La utilización de este método de medida añade tres dificultades tanto al control monovariable de la composición en la base, como al control multivariable:

- 1ª) Cada análisis realizado por el GC requiere aproximadamente 256 seg. y, en consecuencia, el período de muestreo es como mínimo de esta duración.
- 2ª) Se introduce un retardo en la salida del proceso, debido a su medida, igual a un período de muestreo.
- 3ª) La estimación de la exactitud de la medida es  $\pm 0.5\%$ .

### III. 3. 1c Cadenas de Control e Interconexión con el Calculador

La columna está conectada a un calculador digital IBM 1800. Todas las entradas que pueden influenciar significativamente a la columna están supervisadas o controladas por medio de las cadenas de control que muestra la figura III.4. El control de las composiciones en la cabeza y en la base de la columna se lleva a cabo utilizando el calculador IBM 1800 y las acciones de control requeridas, caudales de reflujo y vapor, actúan sobre los puntos de consigna de las cadenas de control de los respectivos caudales.

### III. 3. 2 Experimentos y Resultados Obtenidos

El SCAP ha sido probado extensamente, tanto en control mono como multivariable, en presencia de duras condiciones, tales como perturbaciones discontinuas y aleatorias en la alimentación, cambios de consigna, alto nivel de ruidos de medida y un periodo de muestreo excesivamente largo.

Dichas condiciones actuaron separadamente o en combinación en los experimentos realizados. Entre ellos, presentaremos aquí únicamente los dos experi-

tos de control multivariable que a continuación se describen.

La figura III.5 muestra desde el inicio de la acción de control, los resultados de un experimento de 6 h. 24 min. de duración. Previamente el SCAP se había comportado según su acción pasiva de identificación durante algunos instantes de muestreo.

Los valores iniciales dados a los parámetros del modelo adaptativo-predictivo, así como el orden de su estructura, fueron elegidos racionalmente. Cuando la acción de mando comienza, el SCAP lleva a las composiciones en la cabeza y en la base de la columna de 96.5 y 1% a 96 y 3%, respectivamente. Posteriormente, a partir del instante 29, mientras la composición en la base se mantiene al 3%, el Sistema lleva a la composición en la cabeza al 97%. A partir del instante 55, la composición en la base es llevada del 3 al 5%, mientras que la composición en la cabeza se mantiene al 97%.

La figura III.6 muestra los resultados de un experimento de 10 h. 40, min. de duración y en el que el SCAP es sometido a cambios discontinuos en el caudal de la alimentación y posteriormente a simultáneos cambios de consigna. Como se puede apreciar, el caudal de alimentación varía de 18 a 21, de 21 a 18, de 18 a 15 y de 15 a 18 g/seg. en los instantes de muestreo 7, 34, 66 y 88, respectivamente. Durante estos cambios se desea que las composiciones en la cabeza y en la base se mantengan a 97 y 5%; posteriormente, y a partir del instante 125, el Sistema conduce a dichas composiciones a los valores 96 y 2%, respectivamente.

En este último experimento debemos hacer notar que el SCAP no detecta el importante efecto de las perturbaciones discontinuas en el caudal de alimentación sobre la composición en la base, hasta dos periodos después de iniciado el mismo, debido al retardo introducido por la medida de la mencionada composición. En consecuencia la acción correctiva correspondiente no afecta a la salida del proceso hasta la tercera medida.

### III.3.3 Análisis Resumido de los Resultados Obtenidos en el Control de la Columna

A partir de los resultados globales obtenidos, analizaremos brevemente a continuación los siguientes aspectos de esta realización:

- a) Control mono y multivariable.
- b) Identificación de parámetros.
- c) Comparación con otros métodos.

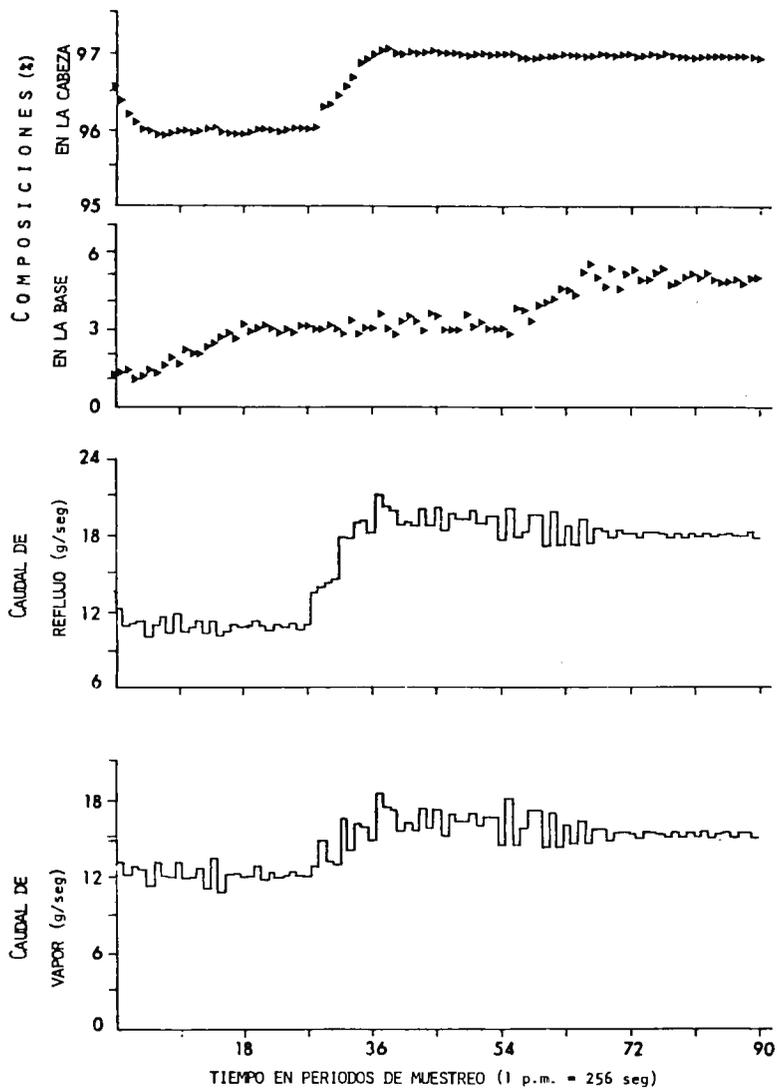


FIGURA III.5-CONTROL MULTIVARIABLE. CAMBIOS DE CONSIGNA

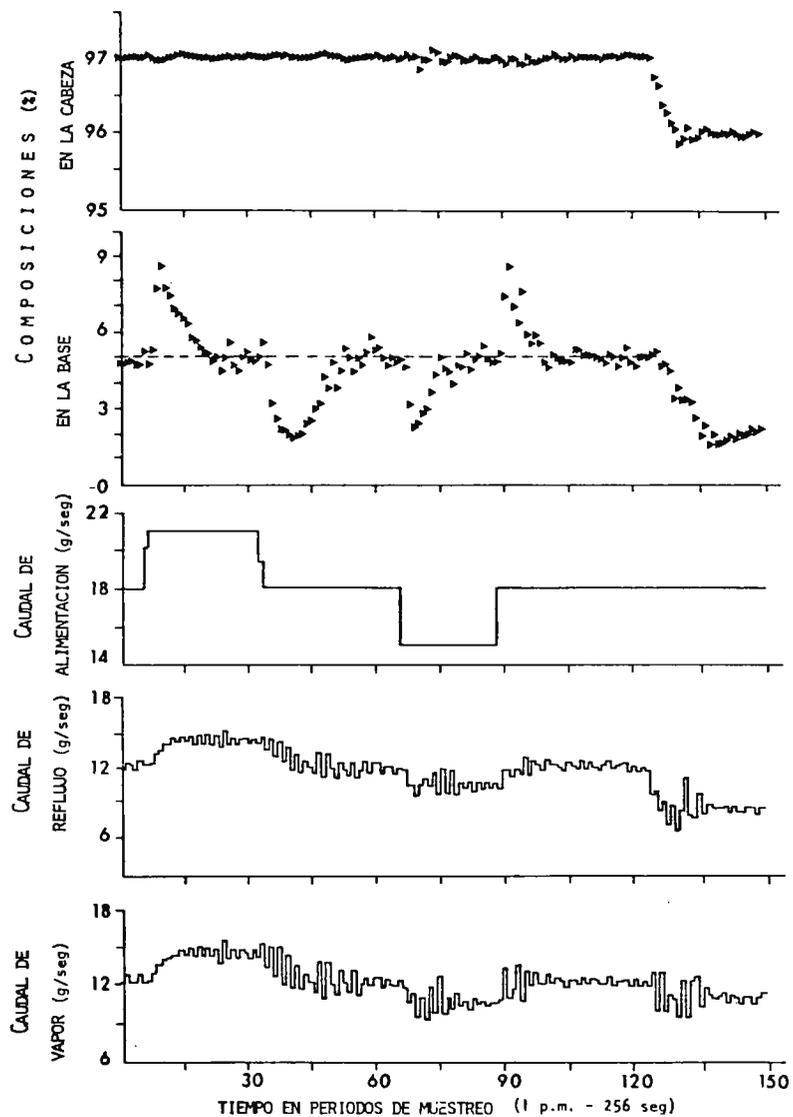


FIGURA III.6 - PERTURBACIONES Y SIMULTANEOS CAMBIOS DE CONSIGNA

a) Control Mono y Multivariable

Los Experimentos realizados han puesto de relieve que la columna de destilación es un proceso altamente no lineal, y han mostrado las siguientes características del SCAP:

- 1- La respuesta a cambios de consigna y perturbaciones discontinuas en el caudal de alimentación, es rápida, sin oscilaciones y con una señal de control no excesiva.
- 2- Se puede utilizar durante las operaciones de puesta en marcha y paro del proceso.
- 3- La presencia de un considerable ruido de medida y un largo período de muestreo no ha deteriorado sensiblemente su rendimiento.
- 4- Utiliza ventajosamente las interacciones del proceso para obtener el control deseado.
- 5- Conservó sus propiedades de estabilidad, incluso en presencia de duras perturbaciones aleatorias, y la compensación anticipada del efecto de las mismas probó su eficacia.

b) Identificación de Parámetros

- 1- No se requiere un conocimiento previo de los parámetros del proceso para la aplicación directa del SCAP.
- 2- La identificación que realizan los parámetros del modelo adaptativo-predictivo con vistas al control, permite a dicho bloque utilizar estructuras de órdenes diferentes.

c) Comparación de otros Métodos

- 1- El SCAP ha demostrado ser superior a cualquier otra técnica hasta ahora conocida, incluyendo SAMR y reguladores auto-ajustables (Los resultados experimentales obtenidos en [39] pueden compararse a los que aparecen en [28]).
- 2- El SCAP ha resuelto satisfactoriamente el conocido problema del control multivariable de una columna de destilación binaria. Citaremos las conclusiones de un estudio previo sobre la misma columna [6], destinado a probar en el área de control multivariable el rendimiento de reguladores PI (acción proporcional + integral) y técnicas de control no interactivo:

" El control directo de las composiciones en la cabeza y en la base de una columna de destilación no es recomendable, a menos que un medio de re-

ducir las interacciones sea empleado.

La esperada mejora en el mando utilizando técnicas de control no interactivo puede ser contrarrestada por las dificultades encontradas en la construcción del modelo. Estas técnicas tendrían una amplia aplicación si las mencionadas dificultades no fueran prohibitivas ".

### III.4 CONCLUSIONES : SIGNIFICACION Y TRASCENDENCIA DEL SISTEMA DE CONTROL ADAPTATIVO-PREDICTIVO

Como compendio de los resultados experimentales hasta ahora obtenidos el SCAP ha probado, poseer las siguientes características:

- 1- Es capaz de conservar la estabilidad asintótica en su aplicación a procesos no lineales y con retardos puros, independientemente de la estabilidad o inestabilidad de los mismos, y a pesar de perturbaciones y ruido de medida.
- 2- La respuesta a los cambios de consigna y perturbaciones, es rápida, sin oscilaciones y con una señal de control no excesiva.
- 3- El rendimiento es notable insensible al orden de la estructura utilizada por el bloque de control.
- 4- La interacción, inherente a los procesos multivariables, es utilizada para obtener los objetivos del control.
- 5- No es necesario un conocimiento acerca de los parámetros del proceso o de sus valores de equilibrio para la aplicación.
- 6- La compensación anticipada del efecto de las perturbaciones es eficaz incluso en condiciones aleatorias extremadamente duras.
- 7- La adaptatividad a diferentes condiciones es inmediata, y la presencia de alto nivel de ruido de medida y un largo período de muestreo no ha deteriorado significativamente su rendimiento.

Otras características prácticas del Sistema, con vistas a su aplicación industrial, son las siguientes:

- a) Puede ser progresivamente asimilado por el operador e integrado con previos controles existentes en el proceso.
- b) El cambio a control manual, y viceversa, es suave y sencillo.
- c) Puede ser utilizado en los procedimientos de puesta en funcionamiento y paro del proceso.
- d) Lleva a cabo una identificación en tiempo real del proceso.

*Las características teóricas y prácticas del Método responden positivamente a las necesidades y requerimientos actuales, y de un futuro previsible, del control de procesos. En consecuencia, parece apropiado para acabar con el presente vacío entre teoría y práctica en dicho dominio.*

*La importancia del Sistema de Control Adaptativo-Predictivo irá afirmándose en un futuro próximo a medida que su conocimiento se extienda y nuevas aplicaciones se realicen. Se puede desde ahora concluir que su aportación teórica y práctica es fundamental y, en consecuencia, su transcendencia está unida a la transcendencia misma de la Teoría de Control.*

REFERENCIAS

- / 1 / K. J. Aström, U. Borisson, L. Lyung and B. Wittenmark, "Theory and Application of Adaptive Regulators Based on recursive Parameters Estimation ", 6th IFAC Congress, Boston, 1975.
- / 2 / K. J. Aström, B. Wittenmark, "On Self-Tuning Regulators", Automatica, 9, pp. 185-199, 1973.
- / 3 / M. Athans, P. L. Falb, "Optimal Control. An Introduction to the Theory and its Applications", Mc Graw-Hill, 1966.
- / 4 / M. Athans, "The Role and Use Of Stochastic Linear-Quadratic-Gaussian Problem in Control System Design". IEEE Trans. on Aut. Contr., AC-16, 529, Diciembre, 1971.
- / 5 / A. V. Balachrishnan, V. Peterka, "Identification in Automatic Control Systems", Cuarto Congreso de la IFAC, Varsovia, 1969 .
- / 6 / M. W. Berry, "Binary Distillation Column Control", M. Sc. Thesis, University of Alberta, 1973.
- / 7 / U. Borisson, "Self-Tuning Regulators - Industrial Application and Multivariable Theory", Report 7513, Department of Automatic Control, Lund Institute og Technology, Octubre 1975.
- / 8 / U. Borisson, R. Syding, "Self-Tuning Control of and ore Crusher", IFAC Symposium on Stochastic Control, Budapest, 1974.
- / 9 / U. Borisson, B. Wittenmark, "An Industrial Application of a Self-Tuning Regulator", IFAC Symposium of Digital Computer Applications to Process Control, Zürich, 1974.
- / 10 / E. H. Bristol, "Adaptive Control Odyssey". Proceedings of the ISA Silver Jubilee Conference, Philadelphia, 1970, p. 561.
- / 11 / D. W. Clarke, B. A. Gawthrop, "A Self-Tuning Controller", Technical Report, Dept. of Engineering Science Oxford.
- / 12 / S. S. Codbole, y C. F. Smith, "A New Control Approach Using the Inverse System", IEEE Trans, Automat. Contr., pp. 698-720, Octubre 1972.
- / 13 / M. Cuenod, A. P. Sage, "Comparison of Some Methods Used for Process Identification", Simposio de la IFAC en Identificación para Sistemas de Control Automático, Praga 1967.
- / 14 / H. Erzberger, "On the Use of Algebraic Methods in the Analysis and

- Design of Model Following Control Systems*", Technical Note D-4663, NASA, 1968.
- ' 15 / A. S. Foss, "Critique of Chemical Process Control", *AICHEJ.*, 19, 209, Marzo 1973.
- ' 16 / R. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems" *Journal of Basic Engineering*, 82, 35, 1960.
- ' 17 / A. Kestenbaum, R. Shinar, and F. E. Thau, "Desing Concepts for Process Control", *Ind. Eng. Chem., Process Desing Develop.* Enero 1976.
- ' 18 / I. D. Landau, "A Survey of Model Reference Adaptive Techniques .Theory and Applications", *Automatica*, Vol. 10, pp. 353-379, 1974.
- ' 19 / I. D. Landau, B. Courtiol, "Adaptive Model Following Systems for Flight Control and Simulation", *AIAA 10th Aerospace Sciences Meeting, San Diego, Enero 1972, Journal of Aircraft, Septiembre 1972.*
- 20 / I. D. Landau, and J. M. Martín Sánchez, "Sistemas Adaptativos Discretos con Modelo de Referencia, Análisis y Síntesis a partir de la Teoría de la Hiperestabilidad", *Congreso Automatica 72*, pp. 1183-1233, Barcelona, Octubre 1972.
- 21 / I. D. Landau, "Synthesis of Discrete Model Reference Adaptive Systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC-16, No 5, pp. 507-508, Octubre 1971.
- 22 / W. Lee, and V. W. Weekman, Jr. "Advanced Control Practice in the Chemical Process Industry: A View from Industry", *AICHE Journal*, Vol. 22, No 1, Enero 1976.
- 23 / P. N. Lion, "Rapid Identification of Linear and Nonlinear Systems", *AIAA J.*, Vol 5, pp. 1835-1842, 1967.
- 24 / W. L. Luyben, "Feedforward Control of Distillation Columns", *Chem. Eng. Prog.*, 61, 74-78, 1965.
- 25 / J. M. Martín Sánchez, "A New Solution to Adaptive Control", *Proceeding of IEEE, Especial Issue on Adaptive Systems*, Agosto 1976,
- 26 / J. M. Martín Sánchez, "A General Asymptotically Stable Control System for Linear Multivariable Time-Variant Plants with Unknown Parameters", *Conference on Information Science and System, Patras, Grecia, 1976.*
- 27 / J. M. Martín Sánchez, "Aportación a los Sistemas Adaptativos con Modelo de Referencia a partir de la Teoría de la Hiperestabilidad", *Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Barcelona (U. P. B.)*, Septiembre

- 1974.
- / 28 / J. M. Martín Sánchez, "Proyecto y Aplicación de Pequeños Ordenadores al Control de Procesos Industriales y Aeroespaciales". Fundación Juan March, Castelló 77, Madrid-6, 1976.
- / 29 / R. G. Mc Ginnis and R. K. Wood, "Control of a Binary Distillation Column Utilizing a Simple Control Law", *Can. J. Chem. Eng.*, 52, 806-809, 1974.
- / 30 / C. Meier, M. Sc. Thesis, University of Alberta, 1976.
- / 31 / J. M. Mendel, "Gradient, Error-Correction Identification Algorithms", *Inform. Sci.*, Vol. 1, pp. 23-42, 1968.
- / 32 / J. M. Mendel, "Discrete Techniques of Parameter Estimation: The Equation Error Formulation". New York: Marcel Dekker, 1973.
- / 33 / J. Nagumo, and A. Nodd, "A Learning Method for System Identification", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC 12, pp. 282-287, 1967.
- / 34 / P. Naslin, "Introduction à la Commande Optimale" Dunod 1967.
- / 35 / V. M. Popov, "The Solution of a New Stability Problem for Controlled Systems", *Automation and Remote Control*, Vol. 24, pp. 1-23, Enero 1963.
- / 36 / J. Richalet, "Commande Hierarchisée des Processus Industriels". *Congreso Automática 72*, pp. 839-857, Barcelona, Octubre 1972.
- / 37 / J. Richalet, A. Rault, R. Pouliquen, "Identification des Processus par la Méthode du Modèle". Publicado por Gordon y Breach, Londres 1971.
- / 38 / H. Rosenbrock, "Distinctive Problems of Process Control", *ibid*, 58, 43, Sept. 1962.
- / 39 / V. A. Sastry, D. E. Seborg and R. K. Wood, "An Application of a Self-tuning Regulator to a Binary Distillation Column", *Joint, Aut. Conf.*, Purdue University, 1976
- / 40 / U. F. Simonsmeier, M. Sc. Thesis, University of Alberta, 1976.
- / 41 / E. Sinner, "Etude d'un Régulateur Adaptatif pour la Commande d'une Classe de Procédés Industriels". Thèse de Docteur-Ingenieur, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1973.
- / 42 / R. T. Stefani, "Design and Simulation of a High Performance, Digital, Adaptive, Normal Acceleration Control System Using Modern Parameter Estimation Techniques", Report No. DAC-60637, Douglas Aircraft Co., Santa Monica, California, Mayo 1967.
- / 43 / V. W. Weekman, "Industrial Process Models - State of the Art", Tercer

*Simposio Internacional de Ingenierfa de Reactores, Evanston, Illinois, Septiembre 1974.*

- 44 / C.A. Winsor, R. J. Roy, "The Application of Specific Optimal Control to Desing · of Desensitized Model Following Control Systems", *IEEE Trans. on Aut. Control.* Vol. AC-15, No. 3, Junio 1970.
- 45 / R.K. Wood, and M. W. Berry, "Terminal Composition Control of a Binary Distillation Column", *Chem. Eng. Science*, 28, 1707-1717, 1973.
- 46 / R.K. Wood, and W.C. Pacey, "Experimental Evaluation of Feedback, Feedforward and Combined Feedforward - Feedback Binary Distillation Column Control", *Can. J. Chem. Eng.*, 50, 376-384, 1972.
- 47 / L. Wooyoung, V. W. Weekman, Jr. "Advanced Control Practice in the Chemical Process Industry : A View from Industry " *AICHE Journal*, Vol. 22, No. 1, Enero 1976.
- 48 / P.E. Ykhoff y otros, "Systems Modeling and Identification", *Proceedings del Tercer Congreso de la IFAC, Londres 1967, Butterworths, Londres 1966.*



FUNDACION JUAN MARCH  
SERIE UNIVERSITARIA

**Titulos Publicados:**

- 1.— *Semántica del lenguaje religioso/A. Fierro*  
(Teología. España, 1973)
- 2.— *Calculador en una operación de rectificación discontinua/A. Mulet*  
(Química. Extranjero, 1974)
- 3.— *Skarns en el batolito de Santa Olalla/F. Velasco*  
(Geología. España, 1974)
- 4.— *Combustión de compuestos oxigenados/J. M. Santiuste*  
(Química. España, 1974)
- 5.— *Películas ferromagnéticas a baja temperatura/José Luis Vicent López*  
(Física. España, 1974)
- 6.— *Flujo inestable de los polímeros fundidos/José Alemán Vega*  
(Ingeniería. Extranjero, 1975)
- 7.— *Mantenimiento del hígado dador in vitro en cirugía experimental*  
José Antonio Salva Lacombe (Medicina, Farmacia y Veterinaria. España, 1973)
- 8.— *Estructuras algebraicas de los sistemas lógicos deductivos/José Plá Carrera*  
(Matemáticas. España, 1974)
- 9.— *El fenómeno de inercia en la renovación de la estructura urbana.*  
Francisco Fernández-Longoria Pinazo (Urbanización del Plan Europa 2.000  
a través de la Fundación Europea de la Cultura)
- 10.— *El teatro español en Francia (1935–1973)/F. Torres Monreal*  
(Literatura y Filología. Extranjero, 1971)
- 11.— *Simulación electrónica del aparato vestibular/J.M. Drake Moyano.*  
(Métodos Físicos aplicados a la Biología. España, 1974)
- 12.— *Estructura de los libros españoles de caballerías en el siglo XVI.*  
Federico Francisco Curto Herrero (Literatura y Filología. España, 1972)
- 13.— *Estudio geomorfológico del Macizo Central de Gredos*  
M. Paloma Fernández García (Geología. España, 1975)
- 14.— *La obra gramatical de Abraham Ibn <sup>c</sup> Ezra/Carlos del Valle Rodriguez*  
(Literatura y Filología. Extranjero, 1970)

- 15.— *Evaluación de Proyectos de Inversión en una Empresa de producción y distribución de Energía Eléctrica.*  
Felipe Ruíz López (Ingeniería. Extranjero, 1974)
- 16.— *El significado teórico de los términos descriptivos.* /Carlos Solís Santos  
(Filosofía. España, 1973)
- 17.— *Encaje de los modelos econométricos en el enfoque objetivos-instrumentos relativos de política económica.* /Gumersindo Ruíz Bravo  
(Sociología. España, 1971)
- 18.— *La imaginación natural (estudio sobre la literatura fantástica norteamericana).* /Pedro García Montalvo  
(Literatura y Filología. Extranjero, 1974)
- 19.— *Estudio sobre la hormona Natriurética.* /Andrés Purroy Unanua  
(Medicina, Farmacia y Veterinaria. Extranjero, 1973)
- 20.— *Análisis farmacológico de las acciones miocárdicas de bloqueantes Beta-Adrenérgicos.* /José Salvador Serrano Molina  
(Medicina, Farmacia y Veterinaria. España, 1970)
- 21.— *El hombre y el diseño industrial.* /Miguel Durán-Lóriga  
(Artes Plásticas. España, 1974)
- 22.— *Algunos tópicos sobre teoría de la información.* /Antonio Pascual Acosta  
(Matemáticas. España, 1975)
- 23.— *Un modelo simple estático. Aplicación a Santiago de Chile.*  
Manuel Bastarache Alfaro (Arquitectura y Urbanismo. Extranjero, 1973)





