

15
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
" Z A R A G O Z A "

"DESARROLLO DE UN SISTEMA EXPERTO EN EL
DISEÑO DE CONTROLADORES
DESCENTRALIZADOS"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
I N G E N I E R O Q U I M I C O
P R E S E N T A N :
N E S T O R N O E L O P E Z C A S T I L L O
M I G U E L A N G E L G U T I E R R E Z D E L G A D I L L O

ASESOR: EDUARDO VAZQUEZ ZAMORA



MEXICO, D. F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1991



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

	Pag
I Introducción.	1
 CAPITULO II GENERALIDADES.	 4
II.1 Aspectos Históricos.	5
II.2 Objetivos de la Dinámica de Procesos.	9
II.3 Objetivos de la Teoría de Control.	11
II.4 Circuitos Básicos de Control.	12
II.4.1 Control Feedback o de Retroalimentación.	13
II.4.2 Control Feedforward o de Alimentación Directa.	15
II.5 Configuraciones de Control (SISO y MIMO).	18
 CAPITULO III SISTEMAS EXPERTOS.	 22
III.1 Inteligencia Artificial.	23
III.1.1 Definición.	23
III.1.2 Breve Historia.	25
III.1.3 Elementos Básicos de IA.	26
III.2 Sistemas Expertos.	33
III.2.1 Definición.	33
III.2.2 Conceptos Básicos de Sistemas Expertos.	34
III.2.3 Ventajas y Desventajas de los Sistemas Expertos.	37
III.2.4 El futuro de Sistemas Expertos en Ing. Química.	39

III.3 Lenguajes de los Sistemas Expertos.	42
III.3.1 Prolog.	43
III.3.2 Lisp.	45
CAPITULO IV CONTROL DECENTRALIZADO.	48
IV.1 Medidas de Interacción.	55
IV.2 Comparación Entre Medidas de Interacción.	67
CAPITULO V METODOLOGIA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL DECENTRALIZADO.	69
V. Metodología para el Diseño de Sistemas de Control Decentralizado.	70
V.1 Selección de la Estructura de Control	70
V.2 Sintonía del Controlador.	72
CAPITULO VI SISTEMA EXPERTO PARA LA SELECCION Y DISEÑO DEL CONTROL DECENTRALIZADO.	73
VI. Sistema Experto para la selección y diseño del control decentralizado.	74
VI.1 Manual del programa CONDEC (CONTROL DECENTRALIZADO).	74
VI.2 Diagramas de flujo.	77
VI.3 Ejemplos del programa.	82
VII. CONCLUSIONES.	85
VIII. BIBLIOGRAFIA.	89

CAPITULO 1

INTRODUCCION

I. INTRODUCCION.

A través del tiempo, la Ingeniería Química se ha ido haciendo cada vez más compleja, al igual que los procesos de la Industria Química. Es por esta razón que los procesos requieren ser controlados con una mayor eficiencia y de tal forma que los resultados obtenidos en el proceso sean óptimos.

Con el tiempo el control de procesos ha pasado de ser un arte, a convertirse en una ciencia con un grado de complejidad 'alto'. Tradicionalmente se ha usado el circuito de control feedback, pero se ha buscado tener una combinación de éste con el circuito de control feedforward.

En la Industria de los Procesos Químicos existen dos tipos de configuraciones de control, dependiendo de cuantas salidas serán controladas y cuantas entradas serán manipuladas las configuraciones pueden ser:

a) SISO (Single Input, Single Output);

b) MIMO (Multiple Input, Multiple Output);

generalmente en la industria la mayoría de los sistemas de control de procesos son MIMO.

Así pues, este trabajo presenta una metodología de como poder seleccionar la estructura de control (control descentralizado), que permite controlar de la mejor forma un proceso con Múltiples Entradas y Múltiples Salidas; buscando la estructura con menor interacción entre las variables de

entrada y las variables de salida, tratando de controlar una salida con una variable manipulable (entrada), es decir, generando los mejores pares de variables de entrada y salida que permitan tener el proceso controlado lo mejor posible.

Con esta metodología se tratará de estructurar un Sistema Experto que conduzca al resultado de la selección de la estructura de control y el diseño del controlador descentralizado. Dicho Sistema Experto, denominado CONDEC (CONtrol DECentralizado), se presenta al final del trabajo, donde además se da una explicación de como usarlo, su diagrama de flujo y un ejemplo de su aplicación.

CAPITULO 2

GENERALIDADES

II. GENERALIDADES.

II.1 ASPECTOS HISTORICOS.

El campo de los sistemas a régimen dinámico y de los controles, ha madurado recientemente de ser arte a ciencia y se expande rápidamente. La tabla 2.1 muestra algunas tendencias y eventos en el campo del control durante los últimos siglos. Esta tabla intenta colocar en perspectiva cómo y porqué este campo se ha desarrollado así.

El primer periodo se extiende desde finales del siglo XVIII hasta principios del siglo XX. Durante este tiempo, el progreso en el campo del control era de naturaleza empírica. El regulador de Watt aplicado para el control de una máquina de vapor, fue posiblemente el único cambio importante en esa etapa del control.

Sin teoría alguna que sostuviera las bases, los primeros experimentos fueron realizados con base en la intuición y el arte, siendo la solución de problemas muy lenta. Una excepción de lo dicho anteriormente es el trabajo de J.C. Maxwell, titulado 'On Governors' que representa el principio del desarrollo teórico.

El periodo II se extiende desde 1900 al inicio de la segunda guerra mundial, abarcando el tiempo en que el progreso estaba ganando fuerza. Esta etapa se caracteriza por el desarrollo industrial el cual demandaba instrumentos y reguladores para que la nueva industria respondiera rápidamente. Algunos de los controladores

TABLA 3.1

ANO	TEORIA DE CONTROL	APLICACION DEL CONTROL	ANTECEDENTES
1750		GOBERNADOR DE WATT Y SU MEJORA	MOLINO DE VIENTOS MAQUINA DE VAPOR PROCESO EN ALGUNA MAQUINARIA
1800			
1830	TRABAJO DE MAXWELL	REGULADORES RELACIONADOS CON LA GENERACION Y TRANSMISION DE ENERGIA	ENERGIA ELECTRICA
1900	ANALISIS DE SISTEMA DE CONTROL DEL TELESCOPIO	PILOTO AUTOMATICO PARA AVIONES	
	LIBRO SOBRE VELOCIDAD DE CONTROL USO DE ECUACIONES DIFERENCIALES Y EL CRITERIO DE ROUTH- HURWITZ EN SISTEMAS SIMPLES	INSTRUMENTOS Y REGULADO- RES PARA INDUSTRIAS DE PROCESO Y GENERADORAS DE ENERGIA	PRIMERA GUERRA MUNDIAL PROGRESO EN LA INDUS- TRIA
	METODO DE ZIEGLER- NICHOLS	CONTROLES PARA COMUNICA- CIONES SERVOMECANISMO	SEGUNDA GUERRA MUNDIAL
1950	APROXIMACION DEL ESPACIO DE LAPLACE Y EL METODO DE FRE- CUENCIA-RESPUESTA METODO DE LA TRANS- FORMADA Z	CONTROLES ELECTRONICOS PLANTA Y PROCESOS CON CONTROLES COMO PARTE ESENCIAL	ENERGIA NUCLEAR COMPUTADORAS
1960	APROXIMACION DE ES- TADO-ESPACIO-CONCEPTO DE LYAPUNOV	COMPUTADORA DIGITAL PARA CONTROL COMPUTACIONAL	AUTOMATIZACION
	TEORIA DEL CONTROL OPTIMO Y TEORIA MA- TEMATICA DE CONTROL DE PROCESOS	CONTROL DIGITAL DIRECTO	PROYECTOS ESPACIALES CONCEPTO DE SISTEMAS Y CONTROL EN EL CAM- PO BIOMEDICO Y OTROS
	ANALISIS DETALLADOS DE CONTROLES OPTI- MOS	PROGRESO HACIA LA OPTI- MIZACION DINAMICA	
1970		DESARROLLO PARA EL SOFT- WARE	EL HOMBRE EN LA LUNA
	LA CALIDAD DEL CON- TROL MEJORA		
	EL DESARROLLO DE NUEVAS TECNICAS DESPIERTA EL INTERES PURAMENTE MATEMATICO OBLIGADO A HACER UNA DIVISION ENTRE EL DESARROLLO PURAMENTE CONCEPTUAL Y EL DESARROLLO DE EQUIPO		
1980			
	LAS COMPUTADORAS Y LA INSTRUMENTACION DE CONTROLES SON UNA PRACTICA COMUN EN LAS PLANTAS DE PROCESO DEBIDO A LA GRAN IMPORTANCIA QUE TIENE LA OPTIMIZACION DE PROCESOS		
1990			

neumáticos, hidráulicos y eléctricos que aparecieron en éste periodo, aun son básicos.

La creciente complejidad de los sistemas de ingeniería requerían y justificaban el uso de la teoría en conjunción con la intuición para el diseño de sistemas de control. El uso de métodos teóricos era limitado principalmente para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias, esto limitaba el empleo de dichas teorías a sistemas simples y de bajo orden; esto, para algunos ingenieros marca el inicio de una nueva era la cual emplearía el feedback obtenido anteriormente por Nyquist, quien en 1932 publicó un estudio sobre la teoría de estabilidad, dando un método gráfico para la determinación de la estabilidad de un sistema, lo cual fue la base de muchos procesos de diseño. Aunque Nyquist solo trabajaba en la amplificación del feedback, sus resultados aplicaban a cualquier tipo de sistema lineal y cuando fueron expandidos, también aplicaron a sistemas no lineales.

El tercer y presente periodo comenzó con el desarrollo inicial de este campo nuevo de la teoría y con la presencia fresca dentro del área de controles automáticos como potencial científico. Ambos, desarrollo y aplicación de la teoría, experimentaron un crecimiento enorme durante la segunda guerra mundial; de ésta manera se marca el inicio del tercer periodo a principios de los 40's, aunque el método de frecuencia-respuesta se haya desarrollado anteriormente, ya que éste caracterizó la

etapa inicial de este periodo. Este método y su aplicación hicieron posible que la teoría del feedback apareciera como ciencia. El desarrollo de las técnicas de frecuencia-respuesta fue después seguido por la introducción del método root-locus de Evans; la teoría básica del feedback avanzó entonces rápidamente incluyendo problemas cuyos fenómenos eran causados por el comportamiento no lineal y acciones de control no lineal.

A fines de los 50's, se redescubrió el punto de vista estado-espacio, lo cual trajo un nuevo enfoque a la solución de problemas de control. Este método es de gran aceptación en el análisis y diseño de sistemas de control. Un aspecto de particular importancia de este nuevo enfoque, fue el desarrollo de la teoría de optimización estática y dinámica, resultado de la demanda por mejorar la calidad del control. Con el desarrollo de dichas técnicas y muchas otras, se ha despertado gran interés en lo puramente teórico llegando a un grado matemático muy sofisticado, siendo casi obligado hacer una división en dos categorías básicas y cada una de ellas con dos subcategorías:

1. Desarrollo conceptual.

- 1.1 Teoría de control, matemáticas, computadoras, etc.

- 1.2 Dinámica de procesos.

2. Desarrollo de equipo.

- 2.1 Analizadores de composición de proceso.

- 2.2 Otros instrumentos y controles.

II.2 OBJETIVOS DE LA DINAMICA DE PROCESOS.

La dinámica de procesos se refiere a la variación de comportamiento con respecto al tiempo de procesos controlados cuando están sujetos a perturbaciones. La dinámica de procesos microscópicos concierne a los fenómenos locales o en pequeña escala, tales como los que ocurren en tuberías y en procesos de difusión. La dinámica de procesos macroscópicos concierne a los procesos en gran escala o comportamiento total del mismo.

La dinámica provee la mejor información necesaria para el estudio del sistema de control. Se considera conveniente dividir la dinámica de procesos macroscópicos en cuatro clases:

La primer categoría son los sistemas de flujo de fluidos. Estos sistemas involucran al flujo de gases y líquidos a través de bombas, válvulas, tanques y tuberías.

La segunda son los sistemas de transferencia de calor, que incluyen intercambiadores de calor, condensadores, rehedidores, etcétera, de tubos y coraza y de doble tubo pero la mayoría de estos sistemas de intercambio de calor incluyen también al flujo de fluidos.

El siguiente grupo son los sistemas de transferencia de masa, estos incluyen fraccionadores, extractores, absorbedores, adsorbedores y cristalizadores. Pero la

transferencia de masa se lleva acabo muy raramente sin transferencia de calor y flujo de fluidos.

El grupo final son los sistemas de reacción química, en estos se tiene transferencia de masa, transferencia de calor , flujo de fluidos, así como también cinética de reacción química.

Uno de los fenómenos más interesantes que emergen del estudio de la dinámica de procesos ha sido el reconocimiento de la teoría y las operaciones unitarias convencionales que son primeramente útiles para el diseño de equipo y para limitar la operación de la planta.

Un aspecto importante del estudio de la dinámica de procesos es una investigación básica de los requerimientos del control de procesos.

Los objetivos del estudio de la dinámica de procesos son:

1. Determinar la manera de controlar las variables importantes de los procesos en las plantas químicas, lo que ayuda a saber si el proceso es estable o inestable y como controlarlo.
2. Ayuda a diseñar el equipo, en este caso los equipos importantes dentro de la planta, tales como reactores y equipo de separación.

II.3 OBJETIVOS DE LA TEORIA DE CONTROL.

La teoría de control de procesos es necesaria debido a que los procesos químicos están sometidos a perturbaciones en sus condiciones de operación. Estas perturbaciones pueden ser variaciones en las temperaturas del proceso o en las intensidades en el suministro o distribución de energía, cambios requeridos en la calidad de los productos o en su demanda, o bien en las combinaciones de ellas.

Los objetivos principales del sistema de control de procesos son:

1. Suprimir la influencia de disturbios externos en un proceso. Esta supresión consiste en hacer los cambios adecuados en el proceso para cancelar los disturbios.
2. Asegurar la estabilidad del proceso. Son procesos inestables, aquellos en los que alguna de sus variables al ser modificada por factores externos no regresa a su estado inicial, por lo que necesitan de un sistema de control externo para lograr la estabilización de su comportamiento.
3. Optimización del funcionamiento de un proceso químico. Esto consiste en hacer los cambios necesarios en las variables indicadas de tal manera que el objetivo económico sea siempre maximizado.

II.4 CIRCUITOS BASICOS DE CONTROL.

Las perturbaciones en un proceso siempre se producen en las variables independientes del mismo, es decir, son debidas a influencias externas. Un cambio en el nivel de una o más variables independientes se traduce en cambios en una o más variables dependientes del proceso. El control de los procesos puede mantenerse solamente imponiendo variaciones en otra variable dependiente que actúe de modo opuesto sobre la operación del proceso. Este efecto contrarresta la primer perturbación y restituye las variables dependientes afectadas a sus niveles originales.

Para entender mejor lo anterior considerese el proceso de la figura 2.1, en la cual el líquido en movimiento está a una temperatura deseada por medio del vapor que fluye por los serpentines de calentamiento. La temperatura del flujo de salida puede ser afectada por los siguientes factores o variables de proceso: temperatura y gasto del líquido entrante, temperatura y gasto del vapor, etcétera. El sistema mostrado en la figura 2.1 generalmente se clasifica como de 'circuito abierto'(open loop). Los sistemas de control de circuito abierto son aquellos en los que la información sobre la variable controlada (en este caso la temperatura) se emplea para ajustar cualquiera de las entradas del sistema con el fin de compensar

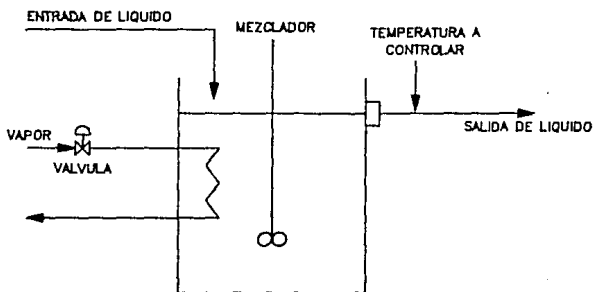
las variaciones del proceso. Por otro lado, un sistema de control de tipo 'circuito cerrado' (close loop) implica que la variable controlada es medida, y el resultado sirve para manipular cualquiera de las variables del proceso, por ejemplo el flujo de vapor.

II.4.1 CONTROL FEEDBACK O DE RETROALIMENTACION.

En el sistema de control de circuito cerrado, la información sobre la variable controlada se vuelve a alimentar como base para controlar una variable de proceso, de donde se le designa como control de retroalimentación o feedback. Esta retroalimentación se logra a través de la acción de un operador (control manual) o por medio de instrumentos (control automático).

En el caso de control manual, para el sistema de la figura 2.1, el operador mide periódicamente la temperatura; si ésta es, por ejemplo inferior al valor deseado, el operador aumenta el flujo de vapor abriendo la válvula. Para el control automático, se tiene un dispositivo sensible a la temperatura para producir una señal (eléctrica, neumática, etc.) proporcional a la temperatura medida. Esta señal se alimenta a un controlador que la compara con un valor deseado ya establecido o set-point.

Si hay diferencia entre los valores, el controlador cambia la abertura de la válvula de control para corregir



• FIGURA 2.1
PROCESO SENCILLO DE INTERCAMBIO DE CALOR

la temperatura como lo indica la figura 2.2. Cabe mencionar que en la actualidad los procesos se controlan casi totalmente por medio de controles automáticos, los cuales en comparación con los manuales, proporcionan mayor precisión entre otras ventajas.

II.4.2 CONTROL FEEDFORWARD O DE ALIMENTACION DIRECTA.

El control feedforward o de alimentación directa se está empleando de manera muy generalizada. Las perturbaciones del proceso se miden y se compensan sin esperar a que un cambio de la variable controlada indique que ha ocurrido una perturbación. Este tipo de controlador es muy útil también en los casos en los que 'la variable controlada final no se pueda medir'. En el sistema de la figura 2.3 el controlador feedforward tiene la capacidad de calcular y utilizar el gasto medido del líquido de entrada y su temperatura para calcular el gasto de vapor necesario para mantener la temperatura deseada en el líquido de salida.

La ventaja en el control feedforward sobre el control feedback es que, en teoría se puede lograr control perfecto ya que un disturbio no produciría cambio alguno en la variable controlada de salida. Las desventajas del control feedforward son:

1. Cuando los disturbios en la composición de alimentación se deben detectar y controlar, no se puede utilizar el control feedforward ya que la

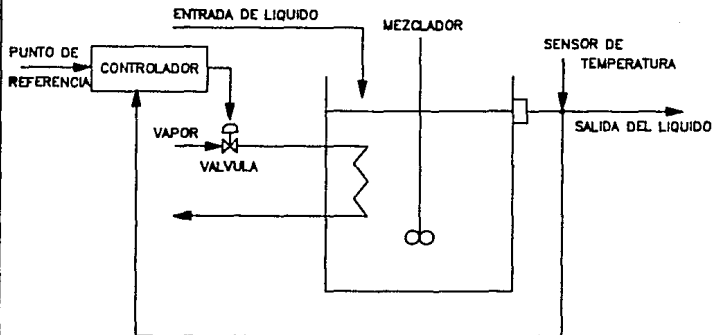


FIGURA 2.2
CONTROL AUTOMATICO DE RETROALIMENTACION DE UN PROCESO
DE INTERCAMBIO DE CALOR

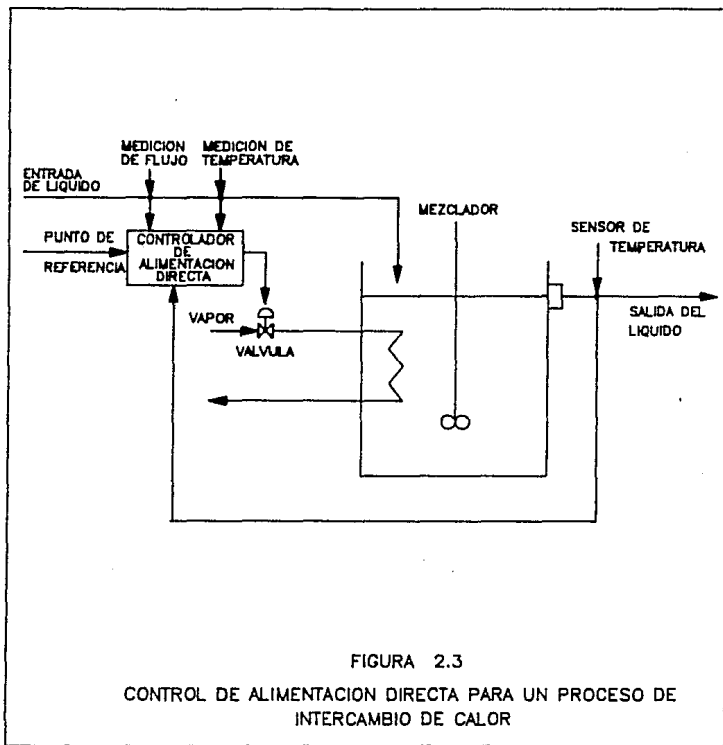


FIGURA 2.3

CONTROL DE ALIMENTACION DIRECTA PARA UN PROCESO DE INTERCAMBIO DE CALOR

composición es una variable difícil de medir, pues el analizador de composición que se requiere rara vez es disponible.

2. Se debe saber como afectan al proceso los disturbios y las variables manipulables. Una de las características del control feedforward es que si no es preciso, puede ser poco efectivo en la reducción del desorden por el disturbio.
3. Es muy raro encontrar modelos de proceso (es decir, la ecuación que resuelve el controlador relacionando el contenido calorífico del líquido de entrada, el flujo de vapor y la temperatura del líquido de salida del sistema empleado anteriormente) y controles perfectos, de manera que es más conveniente utilizar una combinación de control feedback y feedforward (figura 2.4). El controlador feedforward se ocupa de los disturbios grandes y frecuentes mientras que el controlador feedback se encarga de cualquier error a través del proceso, debido a inexactitudes en el controlador feedforward u otros disturbios no medibles.

II.5 CONFIGURACIONES DE CONTROL. (SISO Y MIMO).

Dependiendo de cuantas salidas controladas y cuantas entradas manipuladas se tengan en un Proceso Químico, se pueden distinguir las configuraciones de control

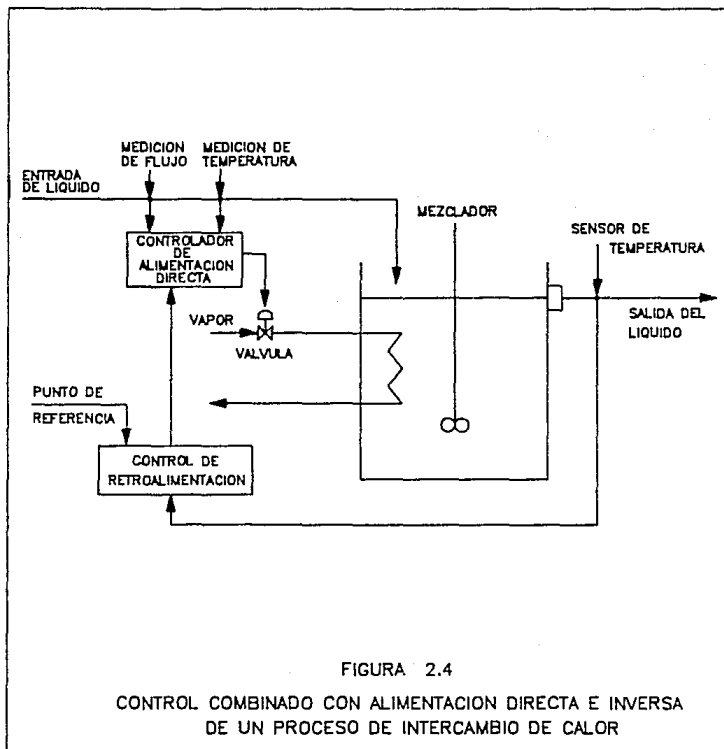


FIGURA 2.4

CONTROL COMBINADO CON ALIMENTACION DIRECTA E INVERSA
DE UN PROCESO DE INTERCAMBIO DE CALOR

siguientes: *Simple-Entrada, Simple-Salida* (SISO); o *Multiple-Entrada, Multiple-Salida* (MIMO); para los sistemas de control.

Por ejemplo para el sistema de un Tanque con Calentamiento:

a) Si el objetivo de control (salida controlada) es mantener el nivel del líquido a un valor deseado, manipulando la cantidad de flujo de líquido de salida; se deberá tener un sistema SISO.

b) Por el contrario, si los objetivos de control son (más de uno) mantener el nivel y la temperatura del líquido a unos valores deseados, manipulando (más de una variable) la cantidad de flujo de vapor y la cantidad de flujo de líquido de salida; se deberá tener un sistema MIMO.

En la Industria Química la mayoría de los sistemas de proceso son multiple-entrada, multiple salida (MIMO), pero el diseño de los sistemas SISO es más simple.

La Configuración MIMO es más compleja, debido a que hay más de una configuración de control para procesos con multiples entradas y multiples salidas. Así pues para sistemas MIMO hay un gran número de configuraciones de control; por lo tanto la selección de la estructura de control más apropiada es la cuestión central y crítica a ser resuelta; (figura 2.5).

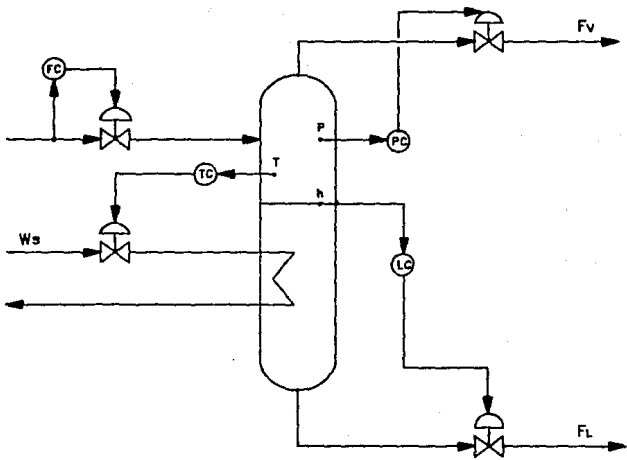


FIGURA 2.5
 UNIDAD DE TANQUE FLASH CON
 MÚLTIPLES ENTRADAS Y MÚLTIPLES SALIDAS

CAPITULO 3

SISTEMAS EXPERTOS

III. SISTEMAS EXPERTOS.

III.1 INTELIGENCIA ARTIFICIAL.

III.1.1 DEFINICION.

El definir que es exactamente la inteligencia artificial (IA), no es precisamente una tarea sencilla comenzando porque la palabra 'Inteligencia' por sí sola, abarca un sin número de conceptos que hasta la fecha no han podido ser correctamente delimitados.

Sin embargo, definimos de una manera simple a la IA como el estudio de las facultades mentales a través del uso de modelos computacionales.

La inteligencia artificial, algunas veces referida a la inteligencia de las máquinas o programación heurística, es una tecnología llevada a cabo en la práctica. Muchas de sus aplicaciones están en desarrollo y decenas de estas se desarrollan ya en su campo. La IA está interesada en desarrollar programas de computadora para hacer a estas más ingeniosas; así esta investigación está enfocada al desarrollo computacional que se aproxime al comportamiento inteligente.

Los programas de cómputo por los cuales se interesa la IA, son originalmente procesos simbólicos que incluyen complejidad, incertidumbre y ambigüedad. Para estos procesos no existe un algoritmo de solución

y es necesario hacer una búsqueda, es decir, para la solución de estos problemas se crean decisiones que algunos humanos enfrentan continuamente en su trato con el mundo.

Esta forma de solucionar problemas difiere marcadamente de los cálculos científicos e ingenieriles que son fundamentalmente de naturaleza numérica, y por lo cual sus soluciones son conocidas para producir respuestas satisfactorias. En cambio, los programas de la IA trabajan con conceptos y frecuentemente no garantizan una solución correcta.

Otro aspecto de los programas de la IA es el uso extensivo del dominio del conocimiento. La inteligencia depende grandemente del conocimiento.

Los principales ámbitos del conocimiento, que han sido estudiados bajo el campo de la IA son:

- Teoría de juegos
- Solución de teoremas
- Percepción: visual, auditiva
- Entendimiento del lenguaje natural
- Sistemas expertos: matemáticas simbólicas, diagnósticos médicos, análisis químicos, diseño de ingeniería, etc.

III.1.2 BREVE HISTORIA.

Las primeras incursiones en la IA fueron realizadas por Samuel y Newell. El primero desarrollo un sistema para jugar ajedrez, con la particularidad de que este sistema no solo jugaba en base a un algoritmo predefinido, sino que usaba; las experiencias de un juego para mejorar su estrategia de las siguientes partidas.

Newell por su parte desarrollo un sistema el cual realizaba las demostraciones del primer capítulo del libro 'Principia', (Whitehead, 1950).

Posteriormente Newell, Shaw y Simon, se enfocaron a tratar de solucionar problemas comunes de la vida diaria, como el de elegir el mejor camino para dirigirse al trabajo por las mañanas. De este trabajo surgió GPS, 'Sistema de resolución de problemas generales'.

Al hacer un análisis sobre el funcionamiento de estos sistemas, se puede observar, que no envuelven una gran cantidad de conocimiento del mundo al cual tratan de modelar.

Esta limitante, la imponian las deficientes técnicas con las que se contaban en esos momentos.

Posteriormente con la evolución en la investigación de la IA, las técnicas para el manejo de cantidades masivas de conocimiento y los avances en la computación, permitieron el inicio de investigaciones en campos más sofisticados del conocimiento humano como

la percepción, visual y auditiva, el entendimiento del lenguaje natural escrito y solución de problemas de dominio específico.

Como ejemplo de las investigaciones en estos campos se tienen:

Percepción auditiva: Reddy, 1976; Walker, 1978; Lea, 1980.

Percepción visual: Winston, 1975; Brady, 1981; Marr, 1982.

Lenguaje natural: Feigenbaum, 1963; Minsky, 1968; Boden, 1977; Schank, 1980; Winograd, 1980.

Sistemas expertos: Feigenbaum, 1977; Stefik, 1982; Sridharam, 1978; Schotliffe, 1979; Kulikowsky, 1980.

III.1.3 ELEMENTOS BASICOS DE IA.

Nilsson un pionero de IA caracterizó los componentes de IA en términos de lo que llama el modelo de unión, figura 3.1. El interior del cuadro representa los elementos básicos.

a) Investigación heurística: Muchos de los trabajos en la IA estuvieron enfocados en derivar programas que investigaran la solución de problemas. Se nota que todo el tiempo se hace una decisión, la situación está cambiando abriendo nuevas oportunidades para más decisiones.

Las técnicas heurísticas, son usadas para hacer más eficiente la búsqueda de soluciones, a menudo

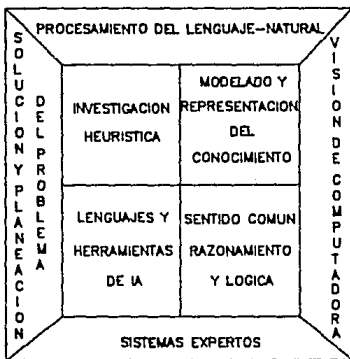


FIGURA 3.1

a costa de la exactitud de las mismas. Las ayudas heurísticas funcionan como una especie de guía de turistas, encontrando las trayectorias de mayor interés y llevando la búsqueda hacia estas trayectorias promisorias.

Algunas de estas técnicas guían el proceso de búsqueda sin sacrificar exactitud. Otras (muchas de ellas las mejores), pueden ocasionalmente no tomar en cuenta la mejor trayectoria, sin embargo en promedio elegirán las alternativas de mejor calidad.

Usando ayudas heurísticas, se puede esperar que se encuentre una muy buena solución, si bien no la óptima, en problemas sumamente complicados.

Existen gran cantidad de técnicas heurísticas de propósito general que pueden ser útiles en una gran variedad de situaciones. Además, es posible construir ayudas heurísticas de propósito especial, para solución de situaciones muy específicas.

b) Representación del conocimiento: Los investigadores descubrieron que la conducta inteligente no es en mucho debida a los métodos de razonamiento, sino que depende del conocimiento. Así cuando el conocimiento sustancial tiene que ser llevado a la práctica en un problema, son necesarios métodos para hacer más eficiente el modelo de este conocimiento de modo que sea accesible. El resultado de este énfasis sobre el conocimiento es que la representación, ha sido una de las áreas más activadas de la investigación de

la IA. El conocimiento necesario no es siempre fácil de representar.

Como se ha visto, uno de los principales resultados arrojados de las primeras investigaciones en la IA, es que la inteligencia requiere forzosamente conocimiento.

Al estudiar las formas de como poder representar el conocimiento en una máquina, los investigadores encontraron que el conocimiento llevaba consigo ciertas características inherentes, estas son:

- Es voluminoso
- Es difícil de caracterizar
- Sufre de constantes cambios.

De cualquier manera, la forma de implementar estructuras sobre conocimiento deberá de cumplir ciertas características, en orden de poder ser usadas por sistemas de IA, estas son:

1. Poder agrupar datos que compartan propiedades importantes.

Con objeto de poder reducir el espacio necesario para almacenar los datos que conforman el conocimiento, los datos que compartan propiedades importantes deben de ser agrupados.

2. Los datos que conformen el conocimiento, deben de estar organizados de tal forma que el usuario final los pueda entender y modificar por si mismo.

Sencillamente, en los sistemas de IA, la retroalimentación es la base de la flexibilidad

de los sistemas. Y dado que estos dependen de los datos almacenados en el conocimiento y que este se encuentra en constante cambio, el diseño para representarlo, deberá de considerar el poder hacer cambios sobre los datos que lo integran.

3. El diseño puede ser flexible para poder reflejar cambios en su medio ambiente.

La flexibilidad es una de las piedras ángulares en cualquier sistema de IA, tanto para corregir errores como para reflejar cambios en su medio ambiente de operación.

4. El conocimiento deberá estar estructurado de tal forma que pueda ser usado en una gran variedad de situaciones.

Las formas de representación del conocimiento, dada la gran diversidad de situaciones que deben de enfrentar, deben contar forzosamente con una gran flexibilidad, además deberán estar fundamentadas sobre razonamientos suficientemente claros y generales.

5. Deberán ser diseñadas de tal manera que ayuden por sí mismas a reducir las búsquedas sobre la base de datos.

Las bases de datos sobre el conocimiento, invariablemente contienen cantidades masivas de información de tal forma que los diseños deben de ayudar a reducir los rangos de posibilidades

en las búsquedas.

Con base a lo anterior, se puede decir que, aunque cualquier técnica desarrollada debe de tomar en cuenta que las estructuras del conocimiento deben de poseer las características anteriores, el depender del conocimiento, las provee de cierta independencia con respecto a los distintos problemas a enfrentar.

c) Sentido común, razonamiento y lógica: Otra importante área en la IA es la lógica. La lógica computacional fué una de las primeras esperanzas doradas en la IA para proporcionar un método universal de solución de problemas. Sin embargo, probar la convergencia de soluciones es difícil con problemas complejos, resultando una disminución en el interés de la lógica. Este interés fué recuperado basado en nuevas formulaciones y el uso de la heurística hacia la guía de soluciones.

d) Lenguajes y herramientas: En la ciencia de la computación, se tuvieron que desarrollar los lenguajes de alto nivel para diferentes dominios de aplicación, estos además, tuvieron que ser acoplados a la IA. Generalmente LISP y PROLOG son los principales lenguajes de programación aplicados a IA.

Aunque no está indicado en la figura 3.1 como elemento básico de la IA, la máquina de aprendizaje (generalmente en etapa de investigación), es un tema importante en la IA. Se dice que una máquina no es inteligente si esta no puede aprender. La realidad

viene cuando la máquina de aprendizaje es realizada, ya varios sistemas de aprendizaje fueron capaces de producir resultados muy interesantes. Algún día, las máquinas serán capaces de aprender durante todo su tiempo de existencia, reforzando la base de conocimiento necesario para un razonamiento avanzado. Estas abrirán nuevas aplicaciones en oficinas, fábricas y hogares.

e) Procesamiento del lenguaje natural: Está interesado en el principio y final del lenguaje natural para programas de cómputo, con el entendimiento del lenguaje de computadora, con el entendimiento y generación del texto y con las aplicaciones relacionadas.

f) Visión de computadora: Se interesa por la capacidad de una computadora para identificar y comprender lo que ella ve, para localizar lo que está buscando y para verificar las correcciones de manufactura.

g) Solución y planeación del problema: Hay muchos problemas para los cuales no hay expertos, pero hay programas de cómputo para las soluciones necesarias. Existen algunos sistemas de planeación básicos que están más interesados con técnicas de solución que con conocimiento.

h) Sistemas expertos: Este es el tema de actualidad en IA. Se refiere a ¿Cómo hacer que una computadora actúe como un experto en algún dominio?

III.2 SISTEMAS EXPERTOS.

Los sistemas expertos son el tema más interesante en la IA actualmente. Desde su inicio hasta la última década, los investigadores de la IA tendieron a buscar técnicas de investigación con conocimiento guiado o lógica computacional para la solución de problemas. Las técnicas logradas son usadas para resolver problemas elementales o problemas bien estructurados, tales como juegos. Sin embargo, los problemas complejos reales tienen las características de tender a buscar espacios para expandirse exponencialmente con el número de parámetros comprometidos. Para tales problemas, estas técnicas viejas tienen una solución generalmente inadecuadas y necesitan una nueva aproximación. Estas nuevas aproximaciones acentúan bastante los conocimientos que buscan y pesan en el campo de conocimientos de ingeniería y sistemas expertos.

III.2.1 DEFINICION.

Los sistemas expertos son una subdisciplina de la inteligencia artificial. Los trabajos pioneros de este tipo se remontan a la década de los años sesenta y, desde entonces, se ha incrementado enormemente su popularidad, pasando del mundo de las investigaciones al campo de la práctica, dando resultados excelentes en áreas como la ingeniería, medicina, finanzas, geología, química, electrónica y la industria en general.

Un sistema experto es un programa de computadora cuyo objetivo principal es emular el razonamiento que

sigue un experto humano para resolver un problema de su especialidad.

También se ha establecido que un sistema experto es un programa de computadora inteligente que usa conocimientos y procedimientos de inferencia para resolver problemas que son bastante difíciles y requieren no sólo de experiencias humanas significantes para su solución. Los conocimientos de un sistema experto se basan en hechos y heurísticas. El buen funcionamiento de un sistema experto es primordialmente función del tamaño y calidad de los conocimientos que procesan.

III.2.2 CONCEPTOS BASICOS DE SISTEMAS EXPERTOS.

Para poder emular el razonamiento, los sistemas expertos constan de los siguientes componentes, que se muestran en la figura 3.2 y se explican a continuación.

1. Usuario. Es el encargado de proveer al sistema de conocimiento, además de interactuar con él.

2. Interfase hombre-máquina. Este módulo se encarga de actuar como interprete entre el usuario y el sistema. Además, facilita al usuario la comunicación con el sistema, ya sea para proporcionarle información, para solicitarla o para interpretarla. Este es uno de los módulos primordiales, ya que constituirá la imagen del sistema ante el usuario.

3. Base de conocimientos. En este módulo, se captura el conocimiento que provee el usuario. Aquí se

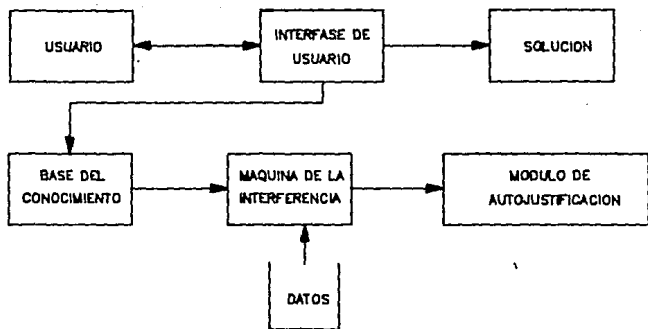


FIGURA 3.2

almacenan todos los conocimientos que pueden estructurarse del experto humano, de tal manera que cada conocimiento es virtualmente independiente de los demás. Cada conocimiento se almacena, generalmente, en una regla de producción.

4. Módulo de inferencia. Este es otro de los módulos fundamentales de un sistema experto, ya que es el encargado de proveer soluciones, en base al conocimiento almacenado. Es el encargado, cuando se inicia una consulta, de encadenar los conocimientos aislados de la base de conocimientos, considerando la información clave del problema, para así exhibir un comportamiento similar al razonamiento deductivo o inductivo, que emplean los expertos humanos para llegar a sus soluciones. Para esto se pueden usar algunos métodos de búsqueda, usando ya sea razonamiento progresivo o regresivo.

5. Justificación. Este es otro de los módulos que hace distintivo a un sistema experto, ya que este debe ser capaz de poder justificar sus acciones, en base al conocimiento con el cual cuenta.

6. Resultados. En esta parte, el resultado del problema así como su justificación, es propuesto al usuario para su análisis. Haciendo uso para esto del módulo de interface con el usuario.

De estos componentes, el más difícil de implantar y el que más influye en el desempeño global del sistema experto, es la base de conocimientos, dado que la

representación del conocimiento humano no es un asunto trivial.

III.2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS EXPERTOS.

¿Para qué sirven los sistemas expertos? ¿Cuándo deben usarse? Aunque no puede precisarse una respuesta, si es posible señalar las características que definen un problema para resolverlo con esta técnica, por ejemplo:

1. Para consolidar y almacenar permanentemente el conocimiento experto que de otra manera se perdería con el tiempo o con la salida de personal calificado.

2. Para aliviar a los expertos humanos del trabajo rutinario.

3. Para instruir a personal con poca experiencia (dado que a un sistema experto pueden hacerse preguntas acerca de qué razonamiento empleó para llegar a determinada solución).

4. Cuando la solución del problema incluye la utilización de conocimiento inexacto, incompleto y/o lo resuelve el experto humano con base en su experiencia, usando heurísticas de solución y su intuición, más que en un conjunto de cálculos.

5. Cuando el conocimiento que se emplea tiende a ser dinámico, pues en sistemas expertos es relativamente sencillo enriquecer la base de

conocimientos al surgir nuevas experiencias.

6. Cuando la consulta de un experto humano es muy costosa o difícil de obtener.

7. Las correcciones o adiciones a la base de conocimientos se realizan en forma sencilla, por lo que el mantenimiento es relativamente fácil.

8. El usuario final no necesita poseer gran experiencia en el área para sacar provecho del sistema.

9. Cuando existe experiencia comprobada en el área de conocimiento que se quiere atacar.

¿Cuándo no usar un sistema experto?

1. Cuando el problema incluye el sentido común.

2. Cuando no existe experiencia comprobada.

3. Cuando el problema requiere del manejo de figuras.

4. Cuando el conocimiento es temporal.

5. Cuando la solución requiere más información de la que podría intercambiarse en una conversación telefónica.

6. Cuando el flujo de control para solucionar el problema es directo.

7. Cuando el problema es bien entendido y está claramente estructurada su solución.

Las mayores limitantes técnicas para sistemas expertos radican en la capacidad de memoria de las computadoras actuales y en su velocidad de procesamiento.

III.2.4 EL FUTURO DE SISTEMAS EXPERTOS EN INGENIERIA QUIMICA.

Las computadoras han sido usadas para supervisar procesos químicos en por lo menos una década. Sin embargo, sus primeras aplicaciones han sido en control digital de tiempo real para las condiciones de la planta, no para niveles más altos de control tales como planeación, programación, tendencias en análisis de procesos, diagnóstico u optimización operacional de grandes plantas. Las computadoras, las cuales reemplazan sistemas análogos de control de procesos, han ayudado a mejorar la seguridad y proporciona mejor información a supervisores de plantas, pero la filosofía básica del control de procesos no ha cambiado. Cada control digital distribuido, donde las pequeñas computadoras interactúan directamente con el equipo y regresan la información a un sistema central de la planta, no ha cambiado fundamentalmente en la forma en que las plantas son operadas.

El control de procesos es todavía manual; la automatización implementa las estrategias de control desarrolladas para el control manual. En el área de diseño y desarrollo de procesos químicos, las computadoras son usadas para:

- Análisis y simulación de procesos.
- Dimensionamiento y cotización de equipo.
- Arreglo de redes de tubería.
- Integración de sistemas de manejo de energía.

●Planeación de proyectos.

●Monitoreo y administración.

Pero, ellos "no saben" como el diseño es hecho y no pueden responder a preguntas como: ¿Por dónde inicio el diseño? ¿Qué hago después? ¿Cuáles simplificaciones y consumos debo hacer para que el diseño proceda? El método y estrategia de diseño radica en la mente de los ingenieros expertos y ellos nunca llegan a ser articulados dentro de la automática, es decir, en procedimientos de computadora implementados.

Además, científicos e ingenieros quienes están involucrados en el diseño de nuevos productos (materiales, solventes, especialmente químicos) o en la evaluación comercial de alternativas químicas o esquemas de producción bioquímico no usan computadoras en su tarea creativa, excepto para obtener datos de una base de datos o realizar cálculos triviales. Consecuentemente, la experiencia acumulada, frecuentemente crítica para una corporación, es muy difícil de organizar, sistematizar, preservar y compartirse con otras; y su utilidad depende de como un individuo usa esta para sus propósitos.

Esta situación está siendo cambiada con la ventaja de obtener sistemas de computación más poderosos, más baratos y con la nueva generación de software basado en los lenguajes de programación LISP y PROLOG y las técnicas de la inteligencia artificial (IA). Los ingenieros químicos pueden ahora comenzar a conocer

acerca de la ayuda de computadoras inteligentes en diseño y desarrollo de procesos, análisis y diagnóstico de las operaciones de proceso, también como en la planeación y programación en la operación de una planta. Grandes compañías de procesos químicos han establecido grupos para explorar la tecnología de los sistemas expertos, tales como, Dupont, Exxon, Shell, Chevron, Amoco, Sun Oil, Air Products, Dow, Procter and Gamble, Union Carbide, General Electric, Mobil, 3M, ICI, BASF, Bayer y Rhone Poulenc.

Las universidades han empezado a responder a preguntas en esas áreas.

Una de las áreas más provechosas para las nuevas técnicas de automatización es aquella donde desarrollan programas que puedan ayudar a los humanos a hacer mejor su trabajo día a día. Esos sistemas involucran el conocimiento usado en actividades repetitivas que son bastante simples.

Estos tipos de sistemas representan aplicaciones potenciales de la ayuda de computadora en la ingeniería de procesos en un plazo cercano. En un futuro más distante, para ésta tecnología conocida de 5 a 7 años, estos sistemas que podran hacer más por el trabajo de ingeniería química, incluyendo el diseño de moléculas con propiedades deseables, y la selección entre alternativas de tecnologías de proceso, incluyendo el uso de los pasos de síntesis bioquímica. Sin embargo, muchas investigaciones se necesitan hacer

antes de que tales sistemas puedan ser desarrolladas.

III.3 LENGUAJES DE LOS SISTEMAS EXPERTOS.

Los lenguajes más utilizados en la IA son el LISP y el PROLOG, estos lenguajes se apartan radicalmente del principio de programación imperativa, que obliga al informático a indicar paso a paso a la computadora lo que debe hacer para calcular el resultado que desea obtener, en favor de la programación declarativa, que consiste en representar en un formato adecuado, conocimientos sobre un determinado tema, a partir de los cuales se deducen las respuestas a las preguntas del usuario.

Un programa redactado en un lenguaje de programación 'clásico' (tanto si se trata de Fortran, Cobol, Pascal, etc.) es la retranscripción de un algoritmo, es decir, de un método de resolución de un problema determinado. En cambio, un programa escrito en PROLOG o LISP no hace más que enunciar un conjunto de hechos pertinentes sobre un campo, en forma de una serie de reglas, que hacen pensar en los axiomas de las matemáticas más que en órdenes dadas a una máquina. Estas reglas son explotadas por un sistema de deducción, capaz de responder a cualquier pregunta cuya respuesta pueda deducirse lógicamente de los conocimientos proporcionados previamente.

III.3.1 PROLOG.

Se puede observar como los campos en la investigación en informática, hacen desempeñar un papel de primer plano a un lenguaje de programación llamado PROLOG (de 'PROgramation en LOGique'). En efecto, estipula que éste, o por lo menos un lenguaje inspirado en PROLOG, son los que deberán 'comprender' las futuras computadoras.

El PROLOG es un lenguaje lógico orientado, desarrollado en 1973 en la Universidad de Aix-Marseille en el laboratorio de IA por Alain Colmerauer y Philippe Roussel. Se ha hecho un trabajo adicional de PROLOG en la Universidad de Edinburgo en Gran Bretaña. El desarrollo del PROLOG ha continuado hasta la actualidad, logrando versiones documentadas que pueden correrse en casi todas las computadoras.

Las características citadas en la introducción de esta parte del capítulo, hacen del PROLOG un lenguaje particularmente adaptado a los problemas que necesitan de la IA, precisamente, los que se intentan resolver no aplicando métodos de cálculo rigurosos y predeterminados, sino con la ayuda de programas que construyen, caso por caso, un razonamiento tomando como base conocimientos previos. Esta forma de proceder se emplea en particular en los Sistemas Expertos, que son programas de ayuda para la decisión.

El PROLOG es un sistema proveedor de teoremas. Así, el programa está formado por axiomas en lógica, en

predicados de primer orden junto con un objetivo (un teorema a ser proveído). Los axiomas están restringidos a implicaciones a los lados izquierdo y derecho, los cuales están escritos en forma de 'Horn Clause'. Un Horn Clause consiste de un conjunto de enunciados unidos por AND's lógicos y teniendo a lo más una conclusión.

Un programa PROLOG consiste de un grupo de procedimientos, donde el lado izquierdo de un procedimiento es un patrón como ejemplo para alcanzar los objetivos del lado derecho del procedimiento.

Procedimiento: Patrón \longrightarrow Objetivos

El PROLOG, puede considerarse como una extensión de LISP, pero junto con un lenguaje relacional de interrogaciones, él utiliza relaciones virtuales (relaciones implícitas definidas por reglas). Como el LISP, el PROLOG es interactivo y utiliza distribución dinámica de memoria.

El PROLOG es un programa mucho más pequeño que LISP y ha sido implementado actualmente en una variedad de computadoras (incluyendo microcomputadoras). La ejecución de PROLOG es sorprendentemente eficiente y en una versión compilada está reclamada a ser más rápida que LISP. El PROLOG se ha vuelto muy popular en Europa y ha sido el objetivo, como lenguaje, para el proyecto de cómputo de la quinta generación de Japón. El diseño PROLOG es adecuado para la búsqueda en paralelo y por lo tanto, es un excelente candidato para

el poderoso futuro de las computadoras que se incorporan al procesamiento en paralelo.

El principal inconveniente de PROLOG parece ser su búsqueda profunda, la cual podría ser una preocupación en ciertos problemas complejos que tienden hacia explosiones combinatorias en el tamaño del espacio de búsqueda.

El PROLOG se desarrollo originalmente en el lenguaje natural para comprender las aplicaciones, pero se ha encontrado uso en virtualmente todas las áreas de aplicación el la IA.

III.3.2 LISP

Este lenguaje fué desarrollado alrededor de 1960 por John McCarthy, como un lenguaje práctico de procesamiento en lista como función recursiva y capacidad para la descripción de problemas y procesos. Todos los datos y programas LISP están en forma simbólica, (expresiones-S) los cuales, están almacenados en listas de estructuras. El LISP trata con dos formas de objetos: átomos y listas. Los átomos son símbolos (constantes o variables) usados como identificadores de nombres de objetos que pueden ser numéricos (números), o no numéricos gente, cosas, robots, ideas, etc.). Una lista es una secuencia de ceros o más elementos encerrados entre paréntesis, donde cada elemento es un átomo o una lista.

Debe notarse que los programas LISP y los datos están en la misma forma, en lista. Así, los programas de la IA pueden manipular otros programas de IA. Esto permite crear o modificar otros programas, una importante característica en aplicaciones inteligentes. También permiten ayudas en programación por dificultades y revisa lo escrito en LISP suministrando gran flexibilidad interactiva para el programador LISP, quien puede así proveer detalles para conformar sus necesidades.

Otros aspectos notables de LISP son:

- El LISP es un lenguaje interpretado interactivo y por lo tanto, relativamente lento. (Sin embargo, puede ser compilado resultando generalmente en un orden de mejoras de magnitud).

- La distribución de memoria es automática.

- Las expresiones LISP son muy sencillas y comunes. Todas las expresiones están hechas de átomos.

- Normalmente el control es aplicativo, el flujo de control es guiado por la aplicación de funciones a argumentos, en contraste con la estructura de control secuencial de la mayoría de los lenguajes de programación.

- Para el tiempo real de operación, el LISP requiere un sofisticado sistema de recolección de desechos, para que las celdas de memoria de reciclo no grandes sean usadas.

- El LISP es un enorme paquete y hasta la llegada de las máquinas LISP personales especiales, la completa capacidad de LISP podría implementarse sólo en grandes computadoras.

- El uso de paréntesis anidados en LISP pueden ser confusos, pero esto puede reducirse de alguna manera dividiendo las expresiones de acuerdo con sus niveles de anidamiento.

CAPITULO 4

CONTROL DECENTRALIZADO

IV. CONTROL DECENTRALIZADO.

Muchos controladores multivariable en las industrias de proceso químico han limitado únicamente el acceso a entradas y salidas de la planta. Reordenando esas variables siempre se hace posible presentar al controlador en una forma diagonal o bloque diagonal (figura 4.1):

$$C(s) = \text{diag} [C_1(s), C_2(s), \dots, C_m(s)] \quad (1)$$

con

$$u_i = C_i(s)(y_i - r_i) \quad (2)$$

Aquí, se supone que los vectores de entradas, salidas y setpoints han sido divididos de la misma manera:

$u = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$, $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$ y $r = (r_1, r_2, \dots, r_m)^T$ respectivamente.

En este trabajo, se considerará cualquier sistema estable $n \times n$ (cuadrado) de circuito abierto $G(s)$ bajo feedback con tales controladores 'decentralizados'. En todos los desarrollos de los que se habla se supone que los controladores $C(s)$ contienen acción integral, por ejemplo $H(s=0) = H(0) = I$, donde $H(s) = G(s)C(s)[I + G(s)C(s)]^{-1}$ denota la matriz de función de transferencia del circuito cerrado para el sistema de la figura 4.1. Cada bloque controlador $C_i(s)$ puede por lo tanto ser descompuesto en una matriz de integradores $K_i/s \cdot I$ y una matriz de compensadores $K_i(s)$ (figura 4.2).

Con respecto al sistema mostrado en la figura 4.2, será adoptada la siguiente notación: I denota cualquier subconjunto de integradores dentro del conjunto $\{1, 2, \dots, m\}$.

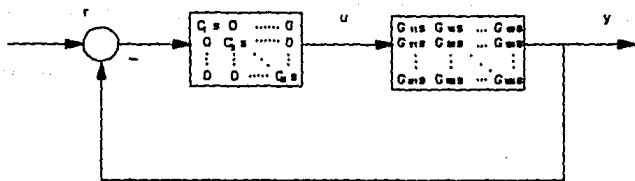


FIGURA 4.1

ESTRUCTURA GENERAL DEL CONTROL DECENTRALIZADO

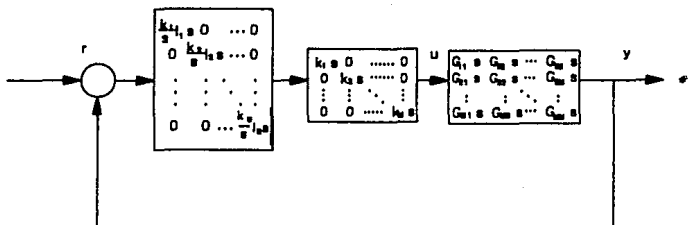


FIGURA 4.2

CONFIGURACION DEL CONTROL DECENTRALIZADO INTEGRAL

donde m es el número de bloques $C_i(s)$ en $C(s)$ y I es el conjunto de todas las posibles i 's. Los subconjuntos I serán usados para definir las subplantas:

$$G_i(s) = \{G_{ij}(s)\}, \quad i, j \in I \quad (3)$$

dentro de $G(s)$. Por ejemplo, si $m = 3$ e $I = \{1,3\}$ entonces:

$$G_i(s) = \begin{bmatrix} G_{i1}(s) & G_{i3}(s) \\ G_{31}(s) & G_{33}(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Las definiciones de las submatrices:

$$G_i(s) \text{ y } H_i(s) = G_i(s)C_i(s)[I + G_i(s)C_i(s)]^{-1}$$

siguen a continuación. $H_i(s)$ denota la matriz de transferencia de circuito cerrado cuando solo los bloques controladores $C_i(s)$ ($\forall i \in I$) son puestos en automático, todos los otros bloques son manuales. En el caso cuando $I = \{i\}$ la notación será:

$$H_i(s) = H_i(s) = G_i(s)C_i(s)[I + G_i(s)C_i(s)]^{-1} \quad (5)$$

Finalmente, si $G_i(s)$ tiene solo una entrada y una salida,

$$G_i(s) = g_{ii}(s) \text{ y } H_i(s) = h_i(s).$$

Los controladores descentralizados han sido preferidos más que los controladores multivariable complejos por las siguientes razones:

1. Facilidad de implementación. El sistema de control tiene menos circuitos de comunicación.
2. Diseño simplificado. El controlador tiene menos parámetros sintonizados.
3. Sintonía descentralizada. Los controladores $C_i(s)$, ($i=1,m$) son sintonizados para hacer a cada bloque $H_i(s)$ estable.
4. Tolerancia de falla. El sistema de control debe de quedar

estable en el caso de falla en el circuito. Este problema no puede ser dirigido en una forma simple con controladores completos.

Las últimas tres razones para usar controladores descentralizados, ya mencionadas, requieren más especificaciones precisas. Un sistema de control descentralizado para una planta $G(s)$ será justificado si estos tienen las siguientes propiedades.

PROPIEDAD 1

Estabilidad. $H_i(s)$ y $H_i(s)$, ($i = 1, m$) son estables y con entradas asintóticamente constantes y error despreciable, por ejemplo $H_i(0) = 1$ u $H_i(0) = I$, ($i = 1, m$).

PROPIEDAD 2

Controlabilidad Integral. Para sintonía simple, el sistema de control debe ser controlablemente integral en el sentido definido por Grosdidier. Con referencia a la figura 4.2 supone que $k_i = k \forall i$. El sistema estable de circuito abierto $Q(s) = G(s)K(s)$, es Integral Controlable (IC) si ahí existe un $k^* > 0$ tal que el sistema de circuito cerrado mostrado en la figura 4.2 es estable para todos los valores de k satisfaciendo que $0 < k \leq k^*$ y tiene error cero de recorrido para disturbios asintóticamente constantes.

El sistema de control debe ser también IC con respecto a cada uno de los bloques controladores $C_i(s)$. El bloque IC se refiere a la habilidad para seleccionar una de las ganancias del controlador k_i . Hacer $I_i = \{1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, m\}$, y

suponer que H_i es estable. El sistema de circuito abierto estable $Q(s) = G(s)K(s)$ es el bloque del IC si ahí existe un $k_i > 0$ tal que el sistema de circuito cerrado mostrado en la figura 4.2 es estable para todos los valores de k_i satisfaciendo que $0 < k_i \leq k_i^*$ y tiene error cero de rastreo para las constantes asintóticamente perturbadas.

PROPIEDAD 3

Tolerancia de Falla. El sistema de control debe permanecer estable cuando la falla ocurre en uno o más de los circuitos Feedback. En este trabajo se supone que las fallas son reconocidas y los bloques controladores correspondientes son puestos en manual. Para la estabilidad dentro de alguna combinación de falla del circuito, se requiere $H_i(s)$ estable, $\forall I \in \xi$.

Si o no un sistema de control descentralizado posee esas tres propiedades depende de la planta, de la estructura de control y de la sintonía del controlador. Por estructuras de control se entiende el número y tamaño de los bloques del controlador y el correspondiente par de la entrada/salida para cada una de estas. En este trabajo una estructura de control será 'aceptable' si ésta puede guiar a un sistema de control descentralizado tal que este posea las propiedades 1 a 3.

Obviamente, estas propiedades son completamente exigidas. En algunos casos, las interacciones en la planta serán tales que esto no será posible para satisfacerlas del todo. En otros casos, ellas serán satisfechas solo con un

gran esfuerzo en el desempeño del circuito cerrado.

Las medidas de interacción (IM's) que se explicarán posteriormente son herramientas de análisis, tal que ayudan tanto a la selección de la estructura de control así como a la selección del controlador. Hay condiciones de $G(s)$, $G(0)$ y $G(s)C(s)$ tales que indican si las propiedades 1 a 3 pueden ser o no satisfechas y dentro de que condiciones. Debe notarse que desde que las propiedades 1 a 3 tienen ajustes invariantes, esto es solo lógico para suponer que esas IM's son también de ajuste invariante. Por ajuste se entiende pre y post multiplicación de la matriz $G(s)$ por matrices diagonales y no singulares.

IV.1 MEDIDAS DE INTERACCION.

La importancia de este apartado es dar la presentación de cada una de las propiedades teóricas de las herramientas y mostrar como están relacionadas con las propiedades 1 a 3.

El Arreglo de Ganancia Relativa. Generalmente ésta es una de las medidas de interacción más usadas, el Arreglo de Ganancia Relativa (RGAR) es una herramienta de aparejamiento para estructuras de control diagonal. Para cada par posible (u_j, y_i) de variables de entrada y salida en un sistema de control, una Ganancia Relativa (RG) está definida como:

$$\lambda_{ij} = g_{ij}(0) \cdot \hat{g}_{ji}(0) \quad (6)$$

Aquí, $g_{ij}(0)$ y $\hat{g}_{ji}(0)$ son los elementos (i,j) ésimo y (j,i) ésimo de las matrices de ganancia de estado estable $G(0)$ y $G^{-1}(0)$. El RGA está definido como la matriz real, escalante invariante:

$$\Lambda = \{\lambda_{ij}\}, \quad i, j = 1, n \quad (7)$$

Un número de rigurosos resultados teóricos son asociados con el RGA. Se muestran los siguientes teoremas:

TEOREMA 1

Estabilidad. Si $\lambda_{ij} < 0$ entonces para cualquier compensador $K(s)$ con las propiedades:

- a) $G(s)K(s)$ es propia
- b) $k_{ij}(s) = k_{ji}(s) = 0, \forall j \in I_i$

y cualquier $k_i > 0, \forall i$, el sistema de circuito cerrado mostrado en la figura 4.2 tiene por lo menos una de las siguientes propiedades:

1. El sistema de circuito cerrado es inestable.
2. El circuito i es inestable por sí mismo, con todos los otros circuitos abiertos.
3. El sistema de circuito cerrado es inestable cuando el circuito i es removido.

El teorema 1 dice que una estructura de control diagonal puede satisfacer las propiedades 1 y 3 solo si está basada en variables aparejadas con RG's positivas. La debilidad de este resultado es que para sistemas más

grandes de 2×2 estas propiedades podrán no ser satisfechas cuando todas las RG's son positivas. Una limitación del RGA es que no está dirigido a fallas de circuito múltiple como lo requiere la propiedad 3.

TEOREMA 2

Vigorosidad. Para una matriz de transferencia $G(s)$ de 2×2 , la mínima condición del número γ^* está dada por:

$$\gamma^* = 0.5 \{ \|A\|_{\infty} + (\|A\|_{\infty}^2 - 4)^{0.5} \} \quad (8)$$

donde

$$\|A\|_{\infty} = \sum_{(i,j)} |a_{ij}|$$

denota el elemento suma de la norma del RGA. Para plantas $n \times n$, la igualdad es reemplazada por la aproximación siguiente:

$$\gamma^* \leq \|A\|_{\infty} \quad (9)$$

El teorema 2 muestra que el RGA está rigurosamente relacionado al modelo de error sensitivo de una planta, así como es cuantificado por el número de mínima condición γ^* . Los sistemas con grandes RG's y por consiguiente con gran γ^* , son sensitivos a errores modelados y son difíciles de controlar sin tomar en cuenta que estrategia de control debe ser usada.

Para el Arreglo de Ganancia Relativa como medida de interacción se debe seleccionar los circuitos (loops) de control de pares de variables (Entrada manipulable-salida controlada) que presenten una ganancia relativa positiva

y cercana a la unidad.

Se puede decir también que:

1. El Arreglo de Ganancia Relativa es una medida de interacción basada en consideraciones de estado estable.

2. El Arreglo de Ganancia Relativa es una matriz cuadrada, lo cual implica que el número de variables manipulables es igual al número de salidas controladas.

3. La suma de ganancias relativas en cualquier renglon o columna es igual a 1.

Bloque de Ganancias Relativas. El Bloque de Ganancias Relativas (BRG's) es la extensión multivariable de las RG's. El BRG de un subsistema cuadrado $G_{ij}(s)$ en $G(s)$ es definido como:

$$A_{ij} = G_{ij}(0) \cdot G_{ji}^{-1}(0) \quad (10)$$

donde $G_{ij}(0)$ es el (j,i) ésimo bloque de la matriz $G^{-1}(0)$.

En una planta $G(s)$ de $n \times n$, el número total de diferentes subsistemas $G_{ij}(s)$ con dimensiones $l \times l$ es $\left[\frac{n}{l} \right]^2$, cada subsistema correspondiente a una subserie de variables de entrada y salida. Por consiguiente un número igual de BRG's puede ser calculado y esto evita un desplazamiento en el arreglo similar.

A pesar de que la simplicidad del RGA es perdida, la utilidad del BRG's permanece igual. El siguiente teorema es una generalización del teorema 1. La $\det(A)$ denota la determinante de la matriz.

TEOREMA 3

Si la $\det(A_{ii}) < 0$ entonces para cualquier compensador $K(s)$ con las propiedades:

- a) $G(s)K(s)$ es propio,
- b) $K_{ij}(s) = K_{ji}(s) = 0, \forall j \in I_i,$

y cualquier $k_i > 0, \forall i$, el sistema de circuito cerrado de la figura 4.2 tiene al menos una de las siguientes propiedades:

1. El sistema de circuito cerrado es inestable.
2. El bloque i es inestable por si mismo, con todos los otros bloques de los circuitos abiertos.
3. El sistema de circuito cerrado es inestable cuando el bloque i es removido.

Los sistemas de control de bloque diagonal satisfacen las propiedades 1 y 3 solo si sus BRG's asociados tienen determinantes positivas. Por simplicidad un BRG con determinante positiva será referido como un BRG positivo. Note que a pesar de que los BRG's son entradas y salidas escaladas dependientes, su propiedad $[\det(A_{ii})]$ no es útil.

Indice de Niederlinsky. Similar al RGA el Indice de Niederlinsky (NI) esta basado en la información de la ganancia en estado estable y es una herramienta solo para la selección de la estructura de control. Inicialmente definido para estructuras de control diagonal, el indice fue después generalizado para estructuras de bloque-diagonal. Este es definido como:

$$\det[G(0)G^{-1}(0)] \quad (11)$$

donde

$$\tilde{G}(s) = \text{diag}[G_{11}(s), G_{22}(s), \dots, G_{mm}(s)] \quad (12)$$

La justificación teórica para NI está basada en el siguiente teorema.

TEOREMA 4

Suponer que:

- $G(s)$ y $\tilde{H}(s) = \tilde{G}(s)C(s)[I + \tilde{G}(s)C(s)]^{-1}$ son estrictamente estables.
- $G(s)C(s)$ es estrictamente propia.
- $\tilde{H}(s)$ tiene error de seguimiento para entradas asintóticamente constantes, por ejemplo $\tilde{H}(0) = I$.

Entonces el sistema de circuito cerrado $H(s)$ será inestable si:

$$\det[G(0) \cdot \tilde{G}^{-1}(0)] < 0 \quad (13)$$

El teorema 4 dice que la propiedad 1 puede ser satisfecha solo si (13) es mayor que 0. Como el RGA, NI es invariante escalante.

Valores propios de Controlabilidad Integral.

TEOREMA 5

Suponer $k_i = k, \forall i$. El sistema racional $Q(s)$ es IC si y solo si todos los valores propios de la matriz $G(s)K(0)$ caen en el lado derecho del plano complejo. El sistema racional $Q(s)$ no es IC si cualquiera de los valores propios de $G(0)K(0)$ caen en el lado izquierdo del plano complejo.

El próximo teorema sigue del teorema 5 y del concepto de BRG.

TEOREMA 6

Asumir que $H_{ii}(s)$ es estable. El sistema racional $Q(s) = G(s)K(s)$ es Bloque-1 IC si y solo si todos los valores propios de la matriz $\Lambda_{ii}^{-1} G_i(0)K_i(0)$ caen en el lado derecho del plano complejo. El sistema racional $Q(s)$ no es bloque-1 IC si cualquiera de los valores propios de $\Lambda_{ii}^{-1} G_i(0)K_i(0)$ caen del lado izquierdo del lado complejo.

Los teoremas 5 y 6 establecen las condiciones necesarias y suficientes para la propiedad 2. Debe notarse que estas condiciones son invariante escalante solo si se tiene cuidado al escalar $C(s)$ consistentemente con $G(s)$. Su principal desventaja es que requieren al usuario para suponer valores para los compensadores $K_i(s)$, ($i = 1, m$).

Arreglo Directo de Nyquist. El Arreglo Directo de Nyquist fue la primer metodología que intentó formular una teoría rigurosa de control descentralizado. Inicialmente introducida como una herramienta para el diseño de controladores diagonales, el método fue posteriormente generalizado a controladores de bloque-diagonal. Este método puede ser usado tanto para la selección de la estructura de control como para la sintonía del controlador.

El siguiente teorema es válido únicamente para controladores diagonales.

TEOREMA 7

Asumir que $G(s)$ y $\tilde{H}(s)$ son estables. Entonces el sistema de circuito cerrado $H(s)$ es estable si:

$$|h_i(j\omega)| < \rho^{-1} \{ | [G(j\omega) - \tilde{G}(j\omega)] \times \tilde{G}^{-1}(j\omega) | \} \quad \forall i, \omega \quad (14)$$

donde $\tilde{G}(s) = \text{diag}[G(s)]$. En la ecuación (14) $\rho(A)$ denota el radio espectral de la matriz A y $|A|$ es la matriz A con todos sus elementos reemplazados por sus valores absolutos. El DNA expresa la restricción impuesta en las funciones de transferencia de circuito cerrado $h_i(j\omega)$, $(i = 1, n)$ las cuales garantizan que el sistema completo es estable.

El DNA es simplemente la norma I escalada optimamente de la matriz $EC(j\omega) = [G(j\omega) - \tilde{G}(j\omega)] \tilde{G}^{-1}(j\omega)$. Esto es también conocido como la raíz de Perron-Frobenius de la matriz $|EC(j\omega)|$ y es una cantidad invariante bajo entrada y salida escalante. Un sistema de control descentralizado diseñado bajo las bases del teorema 7 puede siempre satisfacer las propiedades 1 y 2 si:

$$\rho^{-1} \{ |EC(0)| \} > 1 \quad (15)$$

Además, así:

$$\rho \{ |E_i(j\omega)| \} \leq \rho \{ |EC(j\omega)| \}, \quad \forall i \in \xi, \omega \quad (16)$$

colocando uno a más controladores $G_i(s)$ en manual disminuyendo la restricción de la ecuación (14). Por lo tanto, el sistema de control descentralizado satisface automáticamente la propiedad 3.

Se debe notar que la ecuación (15) es la definición de la dominancia diagonal generalizada para la planta

$\alpha(0)$. Esta condición es independiente de los parámetros de sintonía y es suficiente para garantizar que la estructura de control correspondiente es aceptable.

Las condiciones equivalentes a las ecuaciones (14) y (15) existen para estructuras de control de bloque diagonal pero tienen poca aplicación práctica.

Medida de Interacción μ . Los fundamentos teóricos de la μ IM son idénticos a los del DNA, sin embargo, la μ IM es menos conservativa y de hecho la norma más ajustada la cual puede ser puesta como $H_i(j\omega)$, $i = 1, m$.

TEOREMA 8

Asumir que $\tilde{G}(s)$ y $\tilde{H}(s)$ son estables. Entonces el sistema de circuito cerrado $H(s)$ es estable si

$$\bar{\sigma}[H_i(j\omega)] < \mu^{-1}[E_i(j\omega)] \quad \forall \omega \quad (17)$$

donde $\bar{\sigma}(A)$ denota el valor máximo singular de la matriz A y $\mu(A)$ es el Valor Estructurado Singular (SSV) de A . En la ecuación (17) $\mu[E_i(j\omega)]$ es el valor calculado con respecto a la estructura definida por $\tilde{G}(s)$. Se debe notar que la ecuación (17) trata estructuras de control diagonal y de bloque diagonal en una forma simple.

El cálculo de la μ IM es una emisión de investigación activa. Una técnica efectiva ha sido descrita por Fan y Tits. Los requerimientos de cálculo son similares para realizar una Descomposición del Valor Singular.

Un sistema de control descentralizado diseñado en base al teorema 8, puede siempre satisfacer las

propiedades 1,2 y 3 si:

$$\mu^{-1}\{E(0)\} > 1 \quad (18)$$

Esta condición es por lo tanto suficiente para garantizar que la estructura de control correspondiente es aceptable.

Medida de Interacción de Rijnsdorp. La IM de Rijnsdorp fué introducida como una herramienta para el análisis de interacciones de un sistema con dos entradas y dos salidas. Parecido al DNA y al μ IM's, está puede ser usada para pares de variables y sintonía de los controladores.

Para una planta de 2×2 $G(s) = \{g_{ij}(s)\}$ ($i,j = 1,2$), la IM de Rijnsdorp es definida como:

$$\kappa(s) = \frac{g_{12}(s)g_{21}(s)}{g_{11}(s)g_{22}(s)} \quad (19)$$

La siguiente igualdad muestra la cercana relación con la μ IM:

$$\mu\{E(j\omega)\} = (\kappa(j\omega))^{0.5} \quad (20)$$

y por lo tanto el teorema puede ser reformulado en términos de $\kappa(s)$ en el caso de sistemas de 2×2 . Sin embargo la ecuación (17) es solo una condición suficiente para la estabilidad de $H(s)$. El siguiente teorema da una condición necesaria y suficiente.

TEOREMA 9

Suponer que $G(s)$ y $\tilde{H}(s)$ son estables. Entonces el sistema de circuito cerrado es estable si y solo si:

$$N[1, z(s)] = 0 \quad (21)$$

donde

$$z(s) = \kappa(s)h_1(s)h_2(s) \quad (22)$$

y donde $N[k, g(s)]$ denota el número neto de rodeos del punto $(k, 0)$ por la imagen del contorno D de Nyquist dentro de $g(s)$.

Trivialmente, un sistema de control descentralizado diseñado en base al teorema 9 satisface las propiedades 1-3.

Criterio de Estabilidad de Nyquist. El Criterio de Estabilidad de Nyquist multivariable da una condición suficiente y necesaria para la estabilidad de un sistema de circuito cerrado $H(s) = G(s)C(s)[I + G(s)C(s)]^{-1}$. Bajo la suposición de que $G(s)$ es circuito abierto estable, $H(s)$ será estable si y solo si:

$$N(0, \det[I + G(s)C(s)]) = 0 \quad (23)$$

El Criterio de Estabilidad de Nyquist puede ser usado para dirigir las propiedades 1 y 3 de sistemas de control descentralizado.

Análisis de Funcionamiento. Aunque no está estrictamente incluido en la lista de propiedades para sistemas de control descentralizado, el buen funcionamiento es una característica esencial de cualquier sistema de control, independiente de la estructura de control.

El funcionamiento de un sistema de control puede ser analizado vía el análisis del operador de sensibilidad $[I + G(s)C(s)]^{-1}$. Esta herramienta es necesitada para

compensar el hecho de que ninguna de las IM's antes mencionadas dan una guía para la sintonía del controlador que garantice cualquier especificación de funcionamiento para $H(s)$.

Fisicamente el operador de sensibilidad es la matriz de las funciones de transferencia entre disturbios actuantes a la salida de la planta y el error de rastreo. Para un buen funcionamiento, su magnitud, por ejemplo la $\bar{\sigma}\{[I + G(j\omega)C(j\omega)]^{-1}\}$ deberá ser 'pequeño' a todas las frecuencias. En la práctica $\bar{\sigma}\{[I + G(j\omega)C(j\omega)]^{-1}\}$ puede ser hecha pequeña solo a bajas frecuencias. A frecuencias más grandes ésta alcanzará su máximo y subsecuentemente tomará un valor constante asintótico más grande o igual a la unidad si $G(s)C(s)$ es estrictamente propio. El máximo indica la frecuencia a la cual los disturbios son amplificados en su mayoría y su magnitud sirve como una medida aceptada para el funcionamiento a circuito cerrado. Para un buen funcionamiento, y bajo condiciones típicas, ésta deberá ser no más grande que dos. También es importante la frecuencia a la cual $\bar{\sigma}\{[I + G(j\omega)C(j\omega)]^{-1}\}$ cruza primero la unidad en las abscisas. Esta frecuencia, aproximadamente igual a la amplitud de la banda de frecuencia también sirve como una medida del funcionamiento a circuito cerrado: Todos los disturbios con frecuencia más baja serán inmediatamente rechazados para sistemas de control de circuito cerrado.

IV.2 COMPARACION ENTRE LAS MEDIDAS DE INTERACCION.

El poder de la RGA, BRG's y NI es que ellas son calculadas simplemente y dan condiciones suficientes para eliminar estructuras de control inaceptables. Esas características hacen a las medidas adaptadas idealmente para proteger muchas estructuras alternativas de una manera rápida y eficiente. La Ganancia Relativa y BRG's no están relacionadas con el NI. Ejemplos de estructuras de control con RG's positivas pero NI's negativas pueden ser contruïdos. Ambas medidas son por lo tanto útiles para la selección de la estructura de control.

Otra IM's en estado estable, específicamente los Valores Propios de Controlabilidad Integral, son de utilidad limitada porque ellos requieren a priori un conocimiento de $K(CO)$, ($\alpha = 1, m$).

El DNA y μIM 's son herramientas más poderosas que el RGA, BRG's y NI ya que ellas pueden dirigir tanto la selección de la estructura de control, como el problema de la sintonía del controlador. Sin embargo la μIM es superior a la DNA porque ésta es menos conservativa. Muy pocos sistemas reales son diagonalmente dominantes y aún más pocos son de bloque-diagonalmente dominante. El uso de un acoplador en estado estable puede servir como un paliativo que solo vencerá la propuesta del control descentralizado.

Una desventaja tanto del DNA como del μIM 's, es que ellas dan una guía para la sintonía que garantiza la

estabilidad del sistema de circuito cerrado $H(s)$, pero no su funcionamiento. Además el hecho de que pueden ser arbitrariamente poco probables.

En el caso de sistemas 2×2 , el principal beneficio de la IM de Rijnsdorp sobre la μIM es que usa la ganancia y la fase de información contenida en los elementos de $G(s)$.

CAPITULO 5

METODOLOGIA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL DECENTRALIZADO

V. METOLOGIA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL DECENTRALIZADO.

El diseño de un controlador descentralizado para una planta $G(s)$ puede descomponerse en dos operaciones sucesivas: 1. La selección de una estructura de control aceptable y la sintonía de los controladores $C_i(s)$, $(i = 1, m)$ tal que las propiedades 1-3 sean satisfechas. Estas operaciones forman la base de ésta metología de diseño del sistema de control.

V.1 SELECCION DE LA ESTRUCTURA DE CONTROL.

Dado que una planta de 2×2 ofrece dos alternativas para el control descentralizado, una planta de 3×3 ofrece seis y una planta de 4×4 ofrece veinticuatro alternativas. Evidentemente el número de estructuras alternativas crece rápidamente con el número de entradas y salidas de la planta. Para una planta dada la tarea del diseñador es determinar cual de las muchas estructuras posibles es adecuada.

Esto es únicamente lógico al iniciar ésta búsqueda con las estructuras más simples así como con las herramientas más simples. Para una planta $n \times n$ hay n alternativas diferentes para un controlador totalmente descentralizado, cada una corresponde a una diferente

serie de pares de variables. EL RGA y el NI de la planta pueden ser usados para desechar un gran numero de estas. Todas las estructuras asociadas con RG's negativas o NI's negativas pueden ser eliminadas sin mayores consideraciones ya que se sabe son inaceptables. El cálculo de la $\mu[ECO]$ es únicamente autorizado para aquellas estructuras de control con RG's y NI's positivos. En cambio el cálculo de $\mu[EC(j\omega)]$ sobre algún rango de frecuencia especificado es solo justificado si la $\mu^{-1}[\mu(KO)] > 1$.

Si una búsqueda falla al detectar una estructura de control diagonal aceptable, más estructuras complejas deben ser investigadas. Para una planta $n \times n$, la estructura de control diagonal más simple consiste de un bloque controlador de 2×2 en paralelo con $(n - 2) 1 \times 1$ o controladores Simple-Entrada-Simple-Salida (SISO). Las estructuras de control inaceptables pueden ser eliminados inspeccionando los signos de RG's, BRG's y NI's. La búsqueda para bloques 2×2 con BRG positivo no es necesaria y no debe ser exhaustiva; los bloques SISO con RG's positivos son fácilmente identificados y deben ser explorados primero. No hay ningún punto en la búsqueda para bloques 2×2 con BRG positivo a menos que los bloques $(n - 2) 1 \times 1$, en la estructura de control que tienen a si mismos RG's positivos. Las estructuras de control adicionales pueden ser eliminadas considerando los RG's, BRG's y NI's de submatrices $G_i(s)$, $\forall i \in f$. Por razones de claridad, esta opción no será considerada aquí.

Este método de encontrar estructuras de control aceptables, generaliza en un camino usual, a las estructuras de control de arbitraria complejidad.

En el caso de sistemas de 2×2 , la IM de Rijnsdorp puede ser más apropiada para seleccionar los pares de variables.

V.2 SINTONIA DEL CONTROLADOR.

Las restricciones puestas por la μ IM o por la IM de Rijnsdorp, [ecuaciones (17) y (21)], sirven como guías para sintonizar los bloques del controlador $C_i(s)$, ($i = 1, m$). Cuando los circuitos simples de control $H_i(s)$ son estables, estas guías garantizarán la estabilidad del sistema completo $H(s)$.

El funcionamiento de $H(s)$ puede ser analizado con el operador de sensibilidad $[I + G(s)C(s)]^{-1}$. El funcionamiento mejorado puede ser obtenido variando la amplitud de la banda del $H_i(s)$ ($i = 1, m$) dentro de las restricciones puestas por $\mu^{-1}[E(j\omega)]$. Sin embargo, cualquier esfuerzo tal de 'sintonía fina' es enteramente prueba y error.

CAPITULO 6

SISTEMA EXPERTO PARA LA SELECCION Y DISEÑO DEL CONTROL DECENTRALIZADO

VI. SISTEMA EXPERTO PARA LA SELECCION Y DISEÑO DEL CONTROL DECENTRALIZADO.

En este capítulo se presentarán el manual de usuario en donde se da una explicación de como usar el programa y datos principales de este. además se incluye el diagrama de flujo correspondiente al programa, y por último se desarrollan ejemplos en la ejecución del programa.

VI.1 MANUAL DEL PROGRAMA CONDEC (CONTROL DECENTRALIZADO).

El programa presentado es ejecutado al denominarlo CONDEC, primeras letras de las palabras CONTROL DECENTRALIZADO. Dicho programa fue desarrollado en lenguaje fortran, ya que el presenta ventajas al desarrollar cálculos matemáticos.

Al programa se le puede denominar interactivo, ya que existe una comunicación entre el usuario y el programa, dicho de otro modo, el programa lleva al usuario a la respuesta de su problema sólo al ir introduciendo datos y contestando preguntas que el programa va desarrollando conforme se va ejecutando.

En el momento de entrar al programa él le sugiere que vea la ayuda, esto con la finalidad de poder ejecutar adecuadamente el programa.

Una vez realizado lo anterior, el programa inicia preguntando si sus resultados se introducirán en un archivo o solo aparecerán en la pantalla, decisión hecha por cada

usuario.

Posteriormente entra al menú del programa, donde debe de ir primero a R.G.A., ahí se introducirá el orden de la matriz, el nombre de las entradas y las salidas del sistema y los coeficientes de la matriz de funciones de transferencia.

Como resultado la maquina realizará cálculos para mostrarle la matriz de ganancia relativa, aquí el programa le hará una pregunta, si no entiende la pregunta por ser la primera vez que entra al programa, el programa desplegará una explicación a dicha pregunta y usted posteriormente responderá, obteniendo como respuesta la forma más adecuada de controlar su sistema, es decir, que salidas son controladas con que entradas.

Ahora bien, una vez realizado lo anterior, el programa regresa al menú, donde usted debe de entrar a IN (Índice de Niederlinsky), esta parte es para obtener una respuesta sobre la estabilidad de la estructura de control seleccionada en la parte anterior.

De esta manera corre el programa CONDEC, dando como resultado la estructura de control más adecuada y su estabilidad.

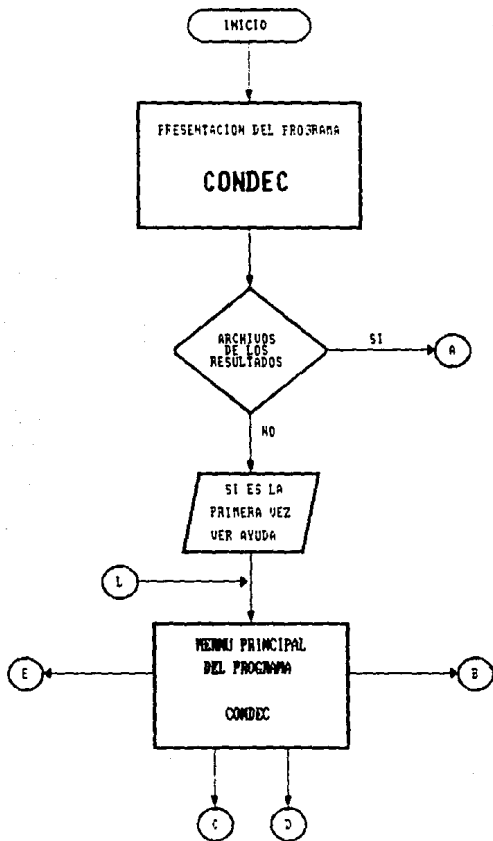
Algo importante que merece ser mencionado, es que en algunas ocasiones al aparecer preguntas en las que hay que responder SI o NO o cualquier otro carácter alfanumérico, estas preguntas deben ser respondidas teniendo activado el bloque de las mayúsculas o Caps Lock.

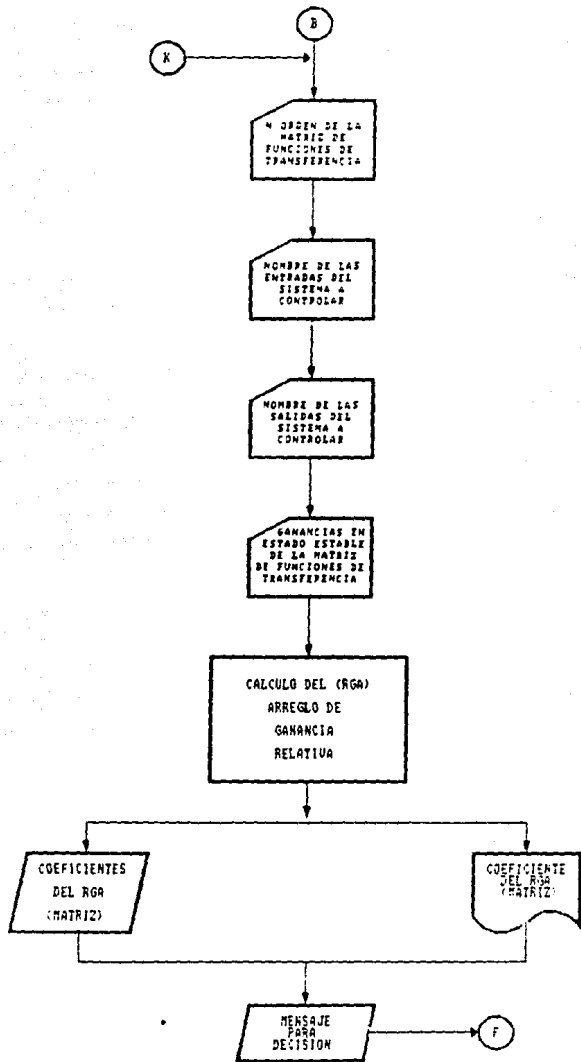
Por último, este programa esta basado principalmente en la teoría matemática y en los criterios del control

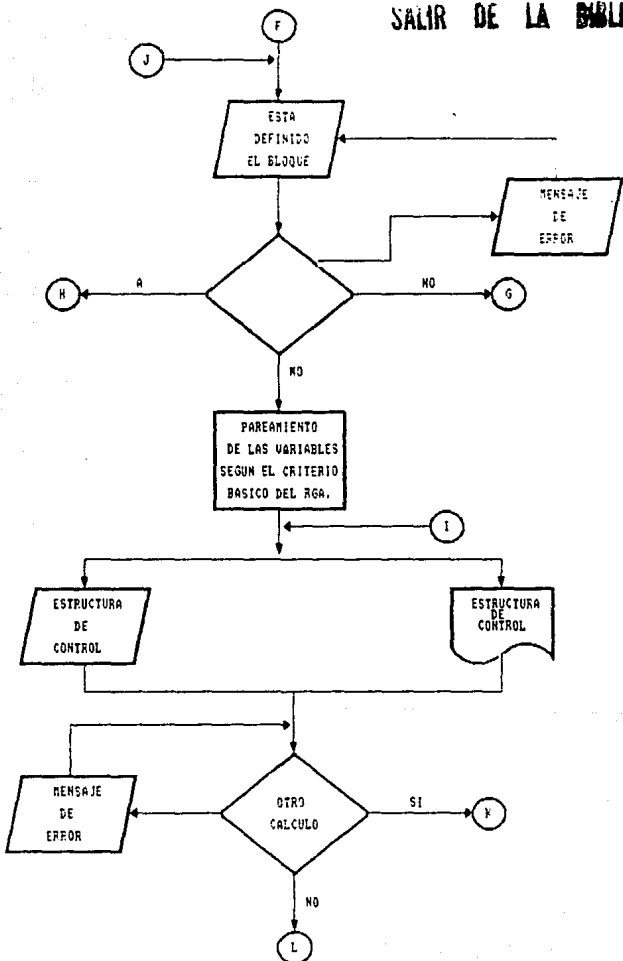
multivariable, los cuales buscan la manera de convertir las configuraciones MIMO en configuraciones SISO de estructura diagonal, es decir, controlar una salida con una entrada, sin tener problemas de control.

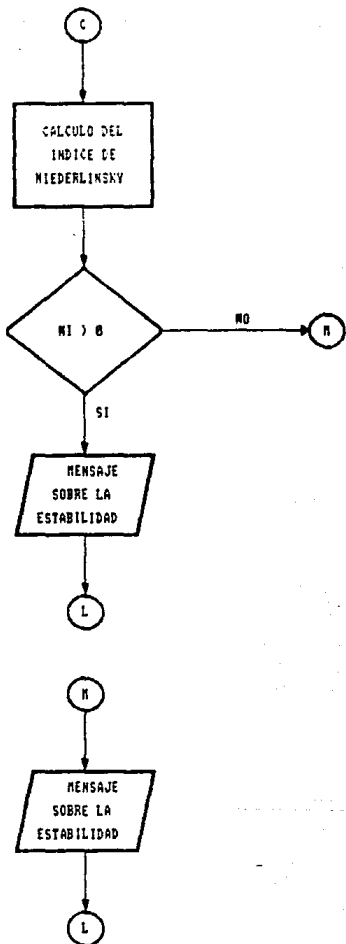
Más adelante se mostrará un ejemplo de como corre el programa CONDEC.

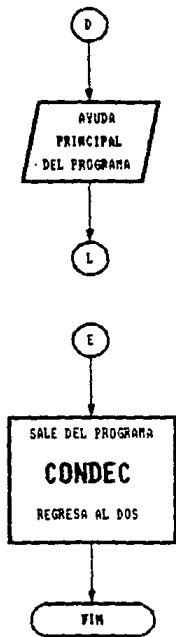
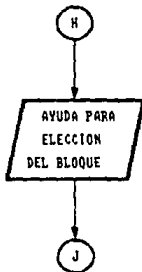
VI. 2 DIAGRAMA DE FLUJO.











VI.3 EJEMPLOS DEL PROGRAMA.

EJEMPLO 1.

ESTE EJEMPLO SE REFERENCIA A LA COLUMNA DE DESTILACION DE DOUKAS Y LUYBEN (1978): QUE MUESTRA LA SIGUIENTE MATRIZ DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN ESTADO ESTABLE.

	U1	U2	U3
Y1	-11.30	0.374	-9.811
Y2	3.24	-1.986	5.984
Y3	-0.33	0.0204	2.38

***** RESULTADOS *****

LOS COEFICIENTES DEL ARREGLO DE GANANCIA RELATIVA SON:

1.000394	-0.098646	0.098252
-0.104310	1.092608	0.011102
0.103916	0.006038	0.890047

EL VALOR ES: 1.00039
SE CONTROLA LA SALIDA: 1. COMPOSICION DEL TOLUENO EN FONDOS.
CON LA ENTRADA: 1. FLUJO DE CORRIENTE LATERAL.

EL VALOR ES: 1.09261
SE CONTROLA LA SALIDA: 2. COMPOSICION DEL TOLUENO EN DOMOS.
CON LA ENTRADA: 2. RELACION DE REFLUJO.

EL VALOR ES: 0.89005
SE CONTROLA LA SALIDA: 3. COMP. DEL BENCENO EN CORRIENTE LATERAL.
CON LA ENTRADA: 3. CARGA TERMICA DEL REBOILER.

EL INDICE DE NIEDERLINSKY: 1.0254

EJEMPLO 2.

ESTE PROBLEMA DE EJEMPLO ESTA BASADO EN UN SISTEMA DE DESTILACION BINARIA DE ALCOHOL Y AGUA: CUYA COLUMNA CUENTA CON 19 PLATOS. Y TIENE UN DIAMETRO DE 12 PULSADAS. ADEMAS DE TENER ALIMENTACION VARIABLE Y UNA CORRIENTE LATERAL: CUYA MATRIZ DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN ESTADO ESTABLE ES LA SIGUIENTE:

	U1	U2	U3
Y1	0.66	-0.61	-0.0019
Y2	1.11	-0.36	-0.012
Y3	-34.69	14.20	0.87

* * * * * R E S U L T A D O S * * * * *

LOS COEFICIENTES DEL ARREGLO DE GANANCIA RELATIVA SON:

1.961816	-0.664813	-0.297002
-0.669922	1.892134	-0.222213
-0.291894	-0.227321	1.919215

EL VALOR ES: 1.96182
SE CONTROLA LA SALIDA: 1. FRACCION MOL DE ETANOL EN DUMOS.
CON LA ENTRADA: 1. CANTIDAD DE REFLUJO (GPM).

EL VALOR ES: 1.89213
SE CONTROLA LA SALIDA: 2. FRACC. MOL DE ETANOL EN CORR. LATERAL.
CON LA ENTRADA: 2. FLUJO DE CORRIENTE LATERAL.

EL VALOR ES: 1.91921
SE CONTROLA LA SALIDA: 3. TEMPERATURA DEL PLATO 19 (C).
CON LA ENTRADA: 3. PRESION DE LA CORRIENTE DEL REBOILER.

EL INDICE DE NIEDERLINSKY: 0.3721

EJEMPLO 3.

ESTE EJEMPLO TIENE COMO REFERENCIA UN SISTEMA DE DESTILACION PARA LA SEPARACION DE BENCENO, TOLUENO Y XILENO: CUENTA CON DOS COLUMNAS COMO EQUIPO PRINCIPAL. EL SISTEMA SE MUESTRA CON LA SIGUIENTE MATRIZ DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA EN ESTADO ESTABLE.

	U1	U2	U3	U4
Y1	4.09	-6.36	-0.25	-0.44
Y2	-4.17	6.93	-0.05	1.11
Y3	-1.73	5.11	4.61	-0.46
Y4	-11.18	14.04	-0.10	4.14

* * * * * R E S U L T A D O S * * * * *

LOS COEFICIENTES DEL ARREGLO DE GANANCIA RELATIVA SON:

3.105771	-0.900663	-0.474876	-0.730232
-5.030838	4.674208	-0.039490	1.046119
-0.083779	0.054300	1.549198	-0.519718
3.008844	-2.827843	-0.034831	0.853031

EL VALOR ES: 3.10577

SE CONTROLA LA SALIDA: 1. PUREZA DEL BENCENO EN DOMOS COLUMNA 1.
CON LA ENTRADA: 1. RELACION DE REFLUJO DE COLUMNA 1.

EL VALOR ES: 4.67421

SE CONTROLA LA SALIDA: 2. PUREZA DEL XILENO EN FONDOS COLUMNA 1.
CON LA ENTRADA: 2. CARGA TERMICA REBOILER COLUMNA 1.

EL VALOR ES: 1.54920

SE CONTROLA LA SALIDA: 3. PUREZA DEL TOLUENO EN FONDOS COLUMNA 2.
CON LA ENTRADA: 3. CARGA TERMICA REBOILER COLUMNA 2.

EL VALOR ES: 0.85383

SE CONTROLA LA SALIDA: 4. DIF. DE TEMP. A TRAVES DE LA COLUMNA 1.
CON LA ENTRADA: 4. FLUJO DE LIQUIDO DE LA COLUMNA 1 A LA 2.

EL INDICE DE NIEDERLINSKY: 0.1006

CONCLUSIONES

VII. CONCLUSIONES.

1. Después de haber realizado este trabajo se puede primero concluir que el control de procesos en la industria química es un aspecto de mucha importancia y complejidad. En lo que respecta a este tema falta mucho por hacer e investigar, ya que día con día los procesos químicos se hacen más complejos, debido a que se está buscando hacerlos cada vez más óptimos en todos los aspectos.

2. El control descentralizado trata de hacer más óptimo y simple, así como eficiente el control de los procesos químicos, ya que este trata de encontrar una estructura de control que tenga la menor interacción entre las variables de entrada (manipulables) y las variables de salida (controladas), tratando siempre que el sistema de control sea de estructura diagonal, es decir, para controlar solo una salida con una entrada.

3. Se vio que de las Medidas de Interacción, para la selección y diseño del control descentralizado, así como para la investigación de su estabilidad, las más útiles fueron el RGA, el BRG, la μ IM y el NI ya que son muy simples de calcular y dan una visión amplia del sistema de control. Estas son herramientas de análisis que asisten al diseñador en su elección de una forma cuantitativa.

4. El uso de controladores descentralizados en las industrias químicas de procesos está justificado si la sintonía es simple y el sistema de control resultante es tolerante a fallas. La capacidad de satisfacer este criterio depende de la elección de la estructura de control y los parámetros de sintonía.

5. Respecto al programa presentado fué desarrollado en lenguaje FORTRAN, debido a que se incluyen en CONDEC muchos cálculos matemáticos relacionados con el modelo del sistema a controlar.

6. El programa CONDEC es interactivo, es decir, puede ser usado por cualquier persona que cuente con el modelo matemático del sistema a controlar; este programa aún es susceptible de muchas mejoras además de poder incluir en él más cálculos.

7. Al programa CONDEC se le pueden adicionar aún más partes, como por ejemplo, poder seleccionar el controlador y dar la respuesta en el tiempo, tanto analítica como gráficamente.

8. Para quien desee recibir este trabajo con fines de investigación se le puede decir que hay mucho que hacer en el campo del control apoyándose en los cálculos computacionales; esperando que este trabajo, incluyendo su programa le pueda ser útil a muchos estudiantes en el área de control de procesos de la industria química.

9. Al programa presentado se le denominó CONDEC (CONTROL DECENTRALIZADO). Este parte de la matriz de funciones de transferencia en estado estable y se obtiene como resultado, si es posible incluir el análisis de control descentralizado al proceso, que salida es controlada con que entrada y la estabilidad de esa estructura de control.

BIBLIOGRAFIA

VIII. BIBLIOGRAFIA.

1. Bañares A. René; Westerberg, Arthur W.
'Developmente of an Expert System for Physical Property Prediction'.
Computer and Chemical Engineering. Vol. 9, No. 2
1985, pp. 128-129.
2. Buckley Page S.
'Techniques of Process Control'.
Robert E. Krieger Publishing Company
Huntington, New York, 1979.
3. Gervarter, William B.
'Introduction to Artificial Intelligence'.
Chemical Engineering Progress
September 1987, pp. 21-37.
4. Grosdidier P., and Morari M.
'A computer aided methodology for the design of decentralized controllers'.
Computer and Chemical Engineering. Vol. 11, No. 4
1987, pp. 423-433.

5. Grosdidier P., and Morari M.
'Interaction Measure for Systems Under Decentralized Control'.
Automatica, Vol. 22, No. 3
1986, pp. 309-319.

6. Luyben, W. L.
'Process Modeling and Control for Chemical Engineers'.
McGraw-Hill (CHES).
USA, 1973.

7. Mejía Lavalle M.; Rodríguez G.
'Análisis de Herramientas para el Desarrollo de Sistemas Expertos'.
Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas
Diciembre 1988, pp. 750-758.

8. Schlader, Stephen T.
'Let an Expert System Troubleshoot'.
CHEMTEC, December 1988, pp. 750-758.

9. Stephanopoulos, George.
'Chemical Process Control. (And Introduction to Theory and Practice'.
Prentice-Hall Inc.

10. Stephanopoulos, George.

'The Future of Expert System in Chemical Engineering'.

Chemical Engineering Progress

September 1987. pp. 44-51.

11. Woolverton, Paul F.

'How to Use Relative Gain Analysis in Systems with Integrating Variables'.

InTech, September 1980, pp. 63-65.

12. Ogunnaike B. A., Lemaire J. P., Morari M., and Ray W. H.

'Advanced Multivariable Control of a Pilot Plant Distillation Column'.

AIChE Journal, Vol. 29, No. 4, July 1983, pp 632-640.