

159
zej



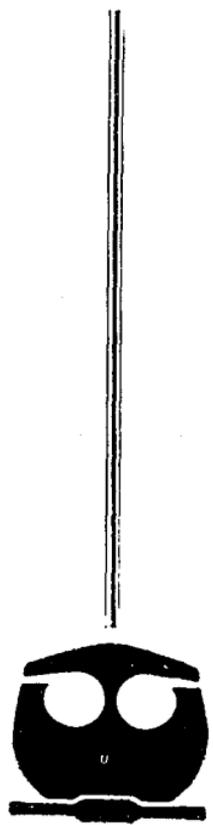
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

“PLANTEAMIENTO DE SISTEMA EXPERTO
PARA AUTOMATIZAR UN REACTOR
INTERMITENTE EXOTERMICO”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A:
JUAN RAMON VALDES RODRIGUEZ

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN





Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS.	I
GLOSARIO	II
Capítulo	
I. INTRODUCCION	1
II. GENERALIDADES	6
Inteligencia Artificial.	6
Evolución de la Inteligencia Artificial	7
Áreas de la Inteligencia Artificial	7
Entendimiento del lenguaje natural	8
Entendimiento del lenguaje hablado	10
Visión computarizada	13
Robótica	14
Sistemas Expertos	16
III. SISTEMAS EXPERTOS	17
Antecedentes	18
Heurística	24
Técnicas de razonamiento	24
Representación y adquisición del conocimiento	25
Representación del conocimiento.	26
Adquisición del conocimiento	27
Ciencia cognoscitiva	28

	Página
Componentes de un sistema experto.	28
Estructura de diálogo.	29
Motor de inferencia	31
Encadenamiento hacia adelante.	31
Encadenamiento hacia atrás	32
Encadenamiento combinado.	36
Base de conocimiento	37
Construcción de un sistema experto	41
Los sistemas expertos aplicados como generadores	44
Aplicaciones de los sistemas expertos	45
Ventajas y limitaciones de los sistemas expertos	47
Sistemas expertos e industria química	50
DENDRAL	52
Análisis de estructuras moleculares	54
METADENDRAL	54
C-13	54
CRYSTALIS	55
GA-1	55
Síntesis de estructuras moleculares	56
OCSS	56
SECSS	56
SYNCHEM-1 y SYNCHEM-2	56
Ayuda en la planeación de experimentos	57
MOLGEN	57
SPEX	58

Capítulo	Página
IV. CONTROL DE PROCESOS QUÍMICOS	59
El control de procesos químicos	59
Contrarrestar las influencias de perturbaciones externas	62
Seguridad en la estabilidad de un proceso.	62
Optimización del funcionamiento de un proceso químico	65
Aspectos del diseño de un sistema de control de proceso	65
Clasificación de las variables en un proceso químico	65
Elementos de diseño de un sistema de control	67
Definición de los objetivos de control	67
Selección de las mediciones	68
Selección de variables manipuladas	70
Selección de la configuración del control.	71
Diseño del controlador	79
Hardware para sistemas de control de proceso	80
Elementos del hardware de un sistema de control	80
Uso de computadoras digitales en procesos de control	84
Nomenclatura para el capítulo V	88
V. Planteamiento de sistema experto para automatizar un reactor intermitente exotérmico	91
Revisión de alternativas	94
Generalización del control para el reactor intermitente	99

	Página
Planteamiento del sistema experto para el control de un reactor intermitente	106
Descripción global del sistema experto	110
Proceso de control	112
Proceso de aprendizaje	121
Estrategias de control convencional asociadas	127
Control estricto de retroalimentación	127
Control adaptable	128
Algoritmo Proporcional Integral Derivativo	129
Conclusiones y Recomendaciones.	132
Apéndice A:	
Tabla I. Algunos sistemas expertos generadores	139
Tabla II. Algunos sistemas expertos comerciales en uso	140
Apéndice B: Diagrama representativo de la secuencia de las reglas de control en el sistema experto conforme a la tabla I (p. 113).	144
Bibliografía	145

GLOSARIO

- **Inteligencia Artificial.** Campo referido a la creacion de maquinas inteligentes y al estudio y desarrollo del pensamiento y aprendizaje en el hombre.
- **Vision Computarizada.** Area de la inteligencia artificial en la que se crea el sentido de la vista, en una maquina, por medio de sensores (por ejemplo, algunos sistemas robotizados).
- **Sistema Experto.** Programa que actua de manera similar a un humano con experiencia en determinada area del conocimiento.
- **Desarrollo Heuristico.** Tecnica para la generacion de hipotesis en base a la experiencia y posterior comprobacion.
- **Motor de Inferencia.** Programa contenido dentro de un sistema experto, que manipula la informacion almacenada en la base de conocimiento para generar hipotesis y comparar conclusiones.
- **Base de Conocimiento.** Conjunto de conocimientos especialmente organizados dentro de un sistema experto.
- **Ingenieria del Conocimiento.** Proceso de construir, probar y evaluar un sistema experto.
- **Representacion del Conocimiento.** Metodo de estructuracion del conocimiento a partir del dominio del experto y posiblemente de otros recursos. Esto se realiza comunmente por medio de generacion de reglas, cuadros, escritura o redes semanticas.

- * **Lenguaje Natural Procesamiento/Entendimiento.** Area de la inteligencia artificial enfocada a la programación con el fin de que se pueda establecer una interfase computadora-usuario por medio del lenguaje hablado y/o escrito.
- * **Robótica.** Area de la inteligencia artificial enfocada a la producción de robots inteligentes, capaces de realizar movimientos, sentir, manipular, y tener otras funciones similares a las del ser humano.
- * **Reconocimiento del Lenguaje.** Uso de la computadora para reconocer un lenguaje y su estructuración.
- * **Procesamiento de Símbolos.** Ejecución en base a la secuencia de símbolos (signos y caracteres) así como a las estructuras de datos.
- * **Explosión combinatoria.** Se alcanza cuando el número de posibilidades a considerar en la operaciones, de proceso del conocimiento, es de un orden de magnitud superior al que la computadora puede manejar.
- * **Algoritmo.** Descripción de los pasos de una tarea concreta del hardware o del software.
- * **Hardware.** Componentes físicos del sistema de cómputo.
- * **Software.** Programas que controlan la operación de una computadora.

- Computadora de la primera generación. Utiliza bulbos (tubos de vacío) como tecnología básica, 50's
- Computadora de la segunda generación. Utiliza transistores como tecnología básica, 60's
- Computadora de la tercera generación. Utiliza la tecnología de circuitos integrados (no microprocesadores), principio de los 70's
- Computadora de la cuarta generación. Utiliza microprocesadores y chips como tecnología básica, finales de los 70's
- Computadora de la quinta generación. Utiliza inferencia para obtener conclusiones razonadas de una base de conocimientos e interactúa con los usuarios a través de una interfase inteligente, a partir de los 80's y aún en desarrollo.
- Programa. Conjunto de enunciados cuasi-lógicos que se procesan de alguna forma para generar una(s) conclusión(es).
- Loop o bucle. Secuencia de instrucciones repetitiva. Cada repetición es un ciclo.

CAPITULO I

INTRODUCCION

Los sistemas expertos son programas de computadora capaces de dar solución a problemas específicos, de manera eficiente, como para que se compare con la solución dada por un experto humano. Constituyen una metodología estructurada para conducir la investigación de manera analógica.

La investigación en sistemas expertos comenzó en los Estados Unidos de Norteamérica a principios de la década de los cincuenta en el equipo de investigación del Instituto Rand-Carnegie, formado por Newell, Shaw y Simon y por el grupo del Instituto Tecnológico de Massachusetts, representado por Minsky y McCarthy, quienes contribuyeron a la formación de la fundación para sistemas expertos.

En la actualidad se considera que los sistemas expertos forman parte del campo de la ciencia de la computación denominado "inteligencia artificial", que se refiere a la creación de máquinas con capacidades suficientes, hasta ahora propias del humano, como para funcionar de manera similar en operaciones tales como el razonar, hablar, explicar el razonamiento, aprender, ver, oír, sentir, etcétera.

La inteligencia artificial tiene sus orígenes a principios de los años cincuenta en los Estados Unidos de Norteamérica. Durante estos años, John McCarthy organizó una conferencia en el Dartmouth College, cuyo principal objetivo era el diseño de máquinas capaces de entender e interpretar los modelos del proceso del pensamiento. Este campo actualmente está dividido en cinco áreas: entendimiento del lenguaje natural, entendimiento del lenguaje hablado, visión computarizada, robótica y sistemas expertos. El interés industrial en estas áreas aumenta rápidamente por sus beneficios como son la reducción de riesgos de operación en procesos altamente peligrosos y el mejoramiento en procesos de control.

En este trabajo se inicia con los conceptos generales de la inteligencia artificial y en especial se detalla, después, lo correspondiente a sistemas expertos, el objetivo central es presentar una posible aplicación de éstos a la ingeniería química, tal es el caso de la automatización de un reactor intermitente exotérmico, que es controlado normalmente por un operador con experiencia.

También se incluyen aspectos generales de sistemas de control, sus características y los problemas que deben resolverse durante su diseño, esto es mostrado cualitativamente.

Por último, se hace el planteamiento concreto del sistema experto para automatizar un reactor intermitente, diseñado para supervisar y controlar dicho reactor.

El proceso seleccionado es intermitente, y por tanto, hay operaciones o decisiones manipuladas por un operador que participa en el control y mejoramiento de la operación de un lote del reactor al siguiente, con base en la experiencia (aprendizaje).

La proposición de un sistema experto para el caso estudiado se inicia con el hecho de que alguna parte del proceso no es completamente comprendida y no se puede formular matemáticamente. Esta parte corresponde a la reactividad térmica y sus efectos en la cinética de reacción. Aun el modelo más completo para este tipo de reactores, en el caso de muchas reacciones de interés industrial, principalmente de polimerización, sólo se aproxima al comportamiento real, por lo que automatizar este tipo de reactor ha tenido que esperar el surgimiento de un método diferente al basado en algoritmos matemáticos.

El sistema experto propuesto se apoya en una estructura compuesta de reglas heurísticas, encaminada a conducir la operación del reactor en forma óptima y segura.

En este trabajo se toma la idea de Daniel R. Lewin y Ram Lavie, presentada en 1989 en su artículo Diseño e Implementación de trayectorias para un Reactor Intermitente Exotérmico (1), donde presentan resultados satisfactorios obtenidos con un sistema experto para automatizar un reactor de este tipo.

Juba y Hamer, en 1986 (2) presentaron una revisión de las alternativas de control para estos reactores hasta ese año, no incluyen el uso de sistemas expertos; sin embargo, su trabajo tiene gran importancia en el estudio de este tema.

Originalmente se pretendió la formulación del sistema experto utilizando un sistema experto generador (o shell), programa que al complementarse con una base de conocimiento produce un nuevo sistema experto para la aplicación, y con las limitaciones propias de dicha base.

El sistema utilizado fue el IMP shell, que es aplicable a problemas relacionados con diagnóstico, inadecuado para manipular la información requerida por un sistema de control.

-
- (1) Lewin, D. y Lavie, R. 1989. Design and Implementing Trajectories for an Exothermic Batch Chemical Reactor. ISA: Industry and Engineering Chemical.
- (2) Juba, M. y Hamer, J. 1986. Progress and Challenges in Batch Process Control. ISA: Chemical Process Control.

La obtención de datos experimentales no fue posible, principalmente por la falta de equipo de instrumentación como son medidores, transductores, etcétera, lo que condujo a suponer un comportamiento representado por un modelo matemático, con lo que se resuelve este problema, pero no el anterior.

Por todo esto, se optó por limitar el alcance del trabajo al planteamiento requerido por el sistema experto para automatizar un reactor intermitente exotérmico.

La metodología empleada se basó principalmente en el estudio de literatura relacionada con el tema, así como en diferentes intentos de programación utilizando el shell mencionado.

CAPITULO II

GENERALIDADES

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La Inteligencia Artificial es una disciplina de la ciencia de la computación cuya finalidad es la creación de máquinas inteligentes. Inteligencia en este sentido significa que las máquinas deben ser capaces de funcionar de manera similar a los humanos en operaciones tales como el razonamiento, el aprendizaje, el habla, la explicación de su razonamiento, la modificación de su conocimiento, revisión de la consistencia del mismo, el manejo de la incertidumbre, el entendimiento, y si son aplicables, la visión, el movimiento, el gusto, el sistema auditivo y el olfato (1). En esta disciplina se estudian las técnicas para lograr que las computadoras puedan hacer tareas que hasta ahora son propias de la gente o que la gente hace mejor (2); "La inteligencia artificial es la ciencia de construir máquinas capaces de hacer cosas que requerirían inteligencia si las realizara una persona" (Minsky, 1968) (3).

-
- (1) Meyer, R. 1987. Encyclopedia of Physical Science and Technology, Vol. 2 USA: Academic Press. pag. 3
- (2) Rich, Elaine. 1983. Artificial Intelligence. USA: McGraw Hill. pag. 34
- (3) Bishop, P. 1984. Fifth Generation Computers. London: Ellis Horwood Limited. pag. 27

EVOLUCIÓN DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La inteligencia artificial tiene sus orígenes al principio de los años cincuenta. Durante estos años, John McCarthy organizó en el Dartmouth College una conferencia cuyo principal objetivo era el diseño de máquinas capaces de pensar, entender e interpretar los modelos del proceso del pensamiento. A principios de los sesenta se desarrolló el lenguaje de programación llamado LISP (LISt Processing). En los últimos años de esa década la mayoría de los proyectos de inteligencia artificial eran solo investigaciones realizadas principalmente por universidades y algunas organizaciones de investigación aplicada, siendo los más importantes los desarrollados por la Universidad de Stanford, el Instituto Tecnológico de Massachusetts, la Universidad Carnelli-Mellon, el Centro de Investigaciones de Xerox en Palo Alto y el Instituto de Investigaciones de Stanford (4).

AREAS DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Dentro del desarrollo de la inteligencia artificial se han distinguido cinco áreas principales (5):

(4) Hayes, R. op. cit., pág. 4.

(5) Id., pág. 6.

1. Entendimiento del lenguaje natural
2. Entendimiento del lenguaje hablado
3. Visión computarizada
4. Robótica
5. Sistemas Expertos

ENTENDIMIENTO DEL LENGUAJE NATURAL

Cuando se extendió el uso de las computadoras, a principios de los sesentas, la única forma en que un usuario podía comunicarse con la computadora era mediante un lenguaje específico, como por ejemplo, el FORTRAN. Estos lenguajes de programación fueron diseñados con un formato muy restringido para facilitar a la computadora el "entendimiento" de la sintaxis y los comandos contenidos en éstos. Como resultado, todos estos lenguajes son muy diferentes a cualquier lenguaje humano.

En los últimos veinte años, los avances en inteligencia artificial han permitido el diseño de programas capaces de aceptar instrucciones con estructuras menos restringidas, tendiendo a un lenguaje natural, como por ejemplo, el inglés. El progreso en el entendimiento del lenguaje natural ha sido lento, por lo que los sistemas que pueden entender realmente el lenguaje humano de manera irrestricta, requerirán de varios años todavía.

Actualmente los programas de computadora pueden hacer razonablemente buenos trabajos en la interpretación literal de las oraciones en inglés en contextos estáticos y limitados a una buena estructuración del dominio de aplicación. Estos programas están comenzando a popularizarse como aplicaciones comerciales de bases de datos.

Los primeros esfuerzos en el entendimiento del lenguaje natural se refieren a la lingüística computacional y al uso de computadoras en el estudio de lenguajes. Se enfatiza la manipulación de símbolos, palabras, y otras entidades lingüísticas en textos escritos en lenguaje natural. Estos esfuerzos produjeron un buen número de programas, capaces de analizar y evaluar las características para el procesamiento de textos y/o traducción de los mismos de un lenguaje a otro en base a la transformación de sintaxis. Desafortunadamente, el éxito logrado en este campo es limitado.

Las investigaciones sobre lenguaje natural han demostrado que para el entendimiento del lenguaje natural por la computadora se necesita algo más que el simple análisis y la transformación de la sintaxis por lo que se ha estudiado el entendimiento del lenguaje humano, un proceso cognoscitivo que comprende diferentes tipos de conocimiento: estructura de las oraciones, significado de las palabras, modelos de recepción de sonidos, reglas de conversación y un conjunto organizado de información sobre un dominio determinado. Una de las primeras metas en esta

aproximación al entendimiento del lenguaje es el funcionamiento de la inferencia en la base de datos almacenados. Esto permitirá que la computadora pueda resolver preguntas que no estén en la base de datos. Por ejemplo, si la computadora tiene en su base de datos los hechos de que: "XX es un oso panda" y "todos los osos panda pertenecen a la familia de los mapaches", entonces la computadora debe ser capaz de responder a la pregunta "¿Es XX un mapache?". Diversos programas del lenguaje natural desarrollados a fines de los sesentas muestran este tipo de comportamiento. Esos programas, generalmente están basados en un proceso denominado análisis sintáctico. Se determina la función de las palabras en las oraciones de entrada, utilizando para ello reglas gramaticales y otros recursos del conocimiento. La designación de un poderoso analizador sintáctico, por lo tanto, es un problema complejo y continua siendo un área importante en la investigación del entendimiento del lenguaje natural.

Probablemente se requerirá de décadas para lograr un pleno entendimiento del lenguaje natural, las investigaciones están contribuyendo cada día con nuevas técnicas para facilitar la comunicación entre el hombre y la computadora.

ENTENDIMIENTO DEL LENGUAJE HABLADO

El entendimiento de palabras, así como el del lenguaje natural ha sido otro de los campos de interés para los investigadores en inteligencia artificial a fin de mejorar y aplicar la

comunicación entre la computadora y el usuario. A diferencia del entendimiento del lenguaje escrito, el lenguaje hablado tiene más limitaciones, ya que hay que agregar las variaciones del medio. Las palabras habladas tienen un gran número de diferencias, que son difíciles de cubrir por una computadora. Entre los problemas más relevantes se encuentran la variación en la forma en que la gente habla. La pronunciación puede ser diferente para varias personas, una misma persona puede decir lo mismo con diferente pronunciación bajo diferentes circunstancias. Las señales acústicas son frecuentemente contaminadas por ruidos y otros tipos de interferencias.

A pesar de estos problemas ha habido avances. La investigación en los sesentas comenzó con esfuerzos para encontrar algoritmos para el reconocimiento de palabras aisladas, este trabajo a través de los años ha dado como resultado sistemas con limitaciones para entender el lenguaje hablado, que tienen aplicaciones comerciales en la actualidad: sólo pueden ser sintonizados para reconocer la voz de un usuario determinado, generalmente su vocabulario es corto, requieren de restricciones en el mensaje de entrada, haciendo claramente pausas entre las palabras para que puedan ser reconocidas. A pesar de sus limitadas capacidades estos sistemas empiezan a tener varias aplicaciones donde la activación por medio de la voz puede aumentar la rapidez de acceso a la computadora.

Esas dificultades por un tiempo limitaron la investigación en esta área, y fue hasta principios de los setentas, cuando la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados para la Defensa (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) inició un ambicioso proyecto que tenía entre sus metas el desarrollo de un sistema real para entendimiento de lenguaje hablado que aceptara la voz continua de varios usuarios y pudiera operar con un vocabulario de 1000 palabras. El proyecto fue un esfuerzo de cinco años llevado a cabo por diferentes equipos de investigación, las metas originales se cubrieron y en algunos casos se sobrepasaron.

Este proyecto también contribuyó a que el entendimiento del lenguaje hablado no fuera limitado al reconocimiento de palabras del idioma hablado solamente; para respaldar dicho proceso de entendimiento se ha requerido de variados recursos sobre el conocimiento del lenguaje, tales como la sintaxis, semántica, acústica, fonética, comunicación, ruidos en el medio, estilo e historia del discurso. Muchos de los conceptos y desarrollos en la arquitectura computacional diseñados para el entendimiento del lenguaje hablado han servido también como cimientos para otras investigaciones en inteligencia artificial (5).

(6) Duda, R. y Shortliffe, E. 1983. Expert Systems Research
USA: Science. pág. 262

VISION COMPUTARIZADA

La vision computarizada es un area con rapido desarrollo dentro de la inteligencia artificial. Su meta es la de proporcionar capacidad visual a las computadoras por medio del analisis y reconocimiento de una escena dada. Uno de los primeros intentos de vision computarizada fue la creacion de algoritmos capaces de procesar imagenes de manera que puedan ser manejadas como informacion, este procesamiento de imagenes ha tenido aplicaciones en lectura de caracteres, analisis de huellas digitales y clasificacion de cromosomas (7). Actualmente, despues de muchos años de investigacion y desarrollo, los sistemas de vision computarizada se han introducido en muchas areas, incluyendo las actividades militares, industriales y laboratorios para aspectos tales como la inspeccion de flujos, clasificacion de piezas, procesamiento de documentos, microscopia, fotointerpretacion, navegacion, guia de soldaduras especiales y ayuda en el desarrollo de robots inteligentes (8).

En esta decada se esperan progresos importantes una vez que se resuelvan los diversos problemas existentes, primero, el sistema de vision requiere de gran capacidad de memoria y manipulacion. Por lo tanto, se requiere incrementar la rapidez en el

(7) Mayes, R. op. cit., pag. 5.

(8) Minskoff, W. 1986. Understanding artificial intelligence
Ed: Texas Instruments Information Publishing Center. pag.
6-1

procesamiento de datos para los procesos de visión. También la información de profundidad de una imagen se pierde y los diferentes componentes de la misma pueden existir donde hay objetos traslapados. Es necesario que las investigaciones futuras consideren la oclusión de múltiples objetos y las interrelaciones de tipo dinámico. Esto sugiere la necesidad de desarrollar formas de almacenamiento de información en gran escala, espacial y temporal, para cada escena.

ROBÓTICA

Esta área de la inteligencia artificial tiene un rápido desarrollo, su finalidad es el diseño y uso de robots. Existen varias definiciones de lo que constituye un robot, actualmente se acepta que los robots son máquinas que pueden ser programadas y reprogramadas para hacer tareas manuales automáticamente. Existen dos tipos de robots (9):

- (a) Robots de exploración. Son máquinas con movimiento en su medio, que sienten y perciben.
- (b) Robots de manipulación. Son máquinas que manipulan el medio u objetos presentes en éste.

Los sentidos son partes integradas a ambos tipos de robots, tienen la finalidad de dar información del medio al robot para que entienda y/o actúe.

(9) MARRAS, R. op. cit. pág. 7

Los robots utilizados para propósitos industriales son los más comunes, generalmente son robots de manipulación, diseñados para mover materiales, partes, herramientas, o mecanismos especializados para ciertas tareas en medios industriales. El robot industrial tiene manos y brazos para manipular objetos y reaccionar a cambios rápidos.

Algunas investigaciones en este campo se orientan al desarrollo de lenguajes computacionales para programación de robots, movimiento y control de robots, desarrollo de nuevas técnicas sensoriales, y la implementación de visión y otros sentidos que no presentan un contacto directo. Los robots controlados por sensores son más versátiles e "inteligentes", especialmente cuando deben operar en medios peligrosos, por ejemplo, aplicaciones militares o industriales (10).

Además del uso de sensores para información retroalimentada, la inteligencia artificial también tiene un papel en robótica debido al complejo software necesario para el control. Esto incluye planeación de trayectoria, modelación geométrica, y capacidades de razonamiento. La planeación de trayectoria complementada con la información retroalimentada, proporcionada por los sensores puede dar de manera más eficiente una trayectoria para el movimiento de robots. La modelación geométrica es un importante tópico de investigación, ya que los

(10) Suda, R. y Skolliff, E. op. cit.
Ed: Jeddica. pag. 265

robots deben entender la tarea y las propiedades geométricas de los objetos en el espacio de trabajo. El razonamiento es el aspecto de más alto nivel en la capacidad de resolución de problemas, donde los sistemas robotizados requieren obtener verdaderas acciones hasta ahora propias del humano.

Los robots del futuro tendrán diferentes niveles de inteligencia, adaptados de acuerdo a sus tareas. El proveer tal inteligencia para hacer robots más versátiles y útiles es una meta de la investigación actual (11).

SISTEMAS EXPERTOS

El área de desarrollo que ha tenido más éxito en inteligencia artificial es sin duda la de los sistemas expertos. Un sistema experto es un programa de computadora que posee un alto nivel de experiencia humana en un terreno muy particular. Los sistemas expertos son el producto de una línea de investigación que se ha concentrado en transferir aspectos específicos de la inteligencia humana a las computadoras. Constituyen una de las áreas de aplicación de las computadoras de la quinta generación y debido al enfoque de este trabajo se tratará en particular en el próximo capítulo.

(11) Mayeda, R. op. cit. pág. 9

CAPITULO III

SISTEMAS EXPERTOS

Un sistema experto es, como se menciona en el capítulo anterior, un programa de computadora que por medio de procedimientos de conocimiento e inferencia puede solucionar problemas que han sido resueltos hasta ahora por expertos humanos.

Los sistemas expertos son particularmente relevantes por su capacidad de inferencia y deducción a partir de estructuraciones deficientes relacionadas a un asunto determinado. Constituyen una metodología estructurada para conducir la investigación de manera analógica, las principales características de un sistema experto son (1):

1. Capaz de funcionar al nivel de un experto.
2. Representa las especificaciones del dominio del conocimiento en la forma en que un experto piensa.
3. Incorpora un proceso explicativo y representa su incertidumbre.
4. Revisa y evalúa problemas que pueden ser representados simbólicamente.

Un sistema experto difiere de un programa convencional, principalmente porque es más tolerante a errores y a conocimiento imperfecto y por tener separado el conocimiento del experto del

(1) Wason, W. 1985. Expert Systems. Ed: John Wiley and Sons. pág. 53.

mecanismo general de razonamiento. Cuando la base de conocimiento y la estructura de control están divididos, la primera puede ser incrementada y/o mejorada; y el mismo sistema general puede ser utilizado para diferentes aplicaciones cambiando una base de conocimiento por otra (2).

ANTECEDENTES

El conocimiento científico se ha caracterizado en gran parte como la capacidad de expresar algo en términos numéricos, con lo que se ha observado la necesidad de tener una descripción cuantitativa de los fenómenos naturales. El campo de los sistemas expertos se ha desarrollado para contener la naturaleza simbólica y las cualidades subjetivas de un fenómeno como un método alternativo a las operaciones numéricas ya que existen casos en que la planeación y solución de problemas es difícil de representar numéricamente, es por ello y debido a que las computadoras digitales se han diseñado para propósitos generales de procesamiento de símbolos que surgió este campo (3).

(2) MINSKOFF, W. 1986. Understanding artificial intelligence
Vdd: David Information Publishing Center.
pág. 31

(3) MARCOVICH, M. 1970. Artificial intelligence in process engineering. Vdd: Academic Press. pág. 268

Existen dos principales corrientes del pensamiento relacionado con la inteligencia artificial (4). Una se refiere al trabajo encaminado a la construcción de artefactos inteligentes y a la búsqueda de principios, métodos, y técnicas útiles en aspectos tales como la construcción de dichos artefactos. La otra se relaciona con el estudio de los procesos del manejo de información en modelos del pensamiento humano (5).

La corriente más importante es la primera. Los trabajos iniciales en este grupo se han encaminado a simples, generales y útiles técnicas de razonamiento, tales como el Sistema de Solución a Problemas Generales de Newell, Shaw y Simon, que fue el primer programa que separó por una parte los métodos para la resolución del problema y por otra el conocimiento necesario para hacerlo (6). Estos métodos generales desafortunadamente no tuvieron éxito en la solución de problemas grandes y complejos como son los problemas de la vida real, ya que no fueron capaces de enfrentarse con el enorme espacio de búsqueda de alternativas. También se reconoció que el conocimiento es tan importante como el razonamiento lógico y surgieron métodos para la representación y uso del conocimiento.

(4) Rich, Elaine. 1983. Artificial intelligence. Utd: McGraw Hill. pág. 70.

(5) Hayes, R. 1987. Encyclopedia of physical science and technology. Utd: Academic Press. pág. 12.

(6) Fernández, J. 1989. Inteligencia artificial y sistemas expertos. España: Ingeniería Educativa. pág. 123.

Los primeros trabajos en sistemas expertos comenzaron en los cincuentas en el equipo de Rand-Carnegie de Newell, Shaw y Simon quienes desarrollaron el "Sistema de Solución a Problemas Generales", capaz de resolver problemas de lógica elemental, ajedrez y algebra. Junto con este equipo, el grupo del Instituto Tecnológico de Massachusetts, de Minsky y McCarthy, a finales de los cincuentas y principios de los sesentas contribuyeron en la formación de la Fundación para Sistemas Expertos. McCarthy inventó el lenguaje de programación LISP (procesamiento de listas - LIST Processing), que es el lenguaje dominante en los Estados Unidos de Norteamérica usado en inteligencia artificial. También en los sesentas, el sistema experto DENDRAL fue iniciado por Lederberg, Buchanan y Feigenbaum con la idea de que pudiera inferir la estructura de una molecula a partir de los datos del analisis hecho con un espectografo de masas. Otros trabajos en sistemas expertos en esta década son el SAINT de Slagle, para integración simbólica, y el STUDENT de Bobrow, para resolución de problemas de algebra comun (7).

A partir de los setentas ha aumentado el interés industrial en el desarrollo de sistemas expertos, hasta nuestros días en que han sido desarrollados en diversas áreas de aplicación, tales como diagnóstico, percepción, instrucción, aprendizaje, juegos, programación, comprobación de teoremas, reconocimiento visual y auditivo.

(7) Minskoff, W. 1986. op. cit. pág. 46

Fue hasta principios de los setentas cuando se inició la aplicación de los resultados obtenidos en las investigaciones en inteligencia artificial. Una de las primeras aplicaciones fue el desarrollo de un sistema de diagnóstico médico llamado MYCIN y otro para el acceso a bases de datos y proyectos de visión industrial llamado LADDER. Sin embargo, el interés comercial en la inteligencia artificial se intensificó a mediados de esta década.

El interés industrial se ha mostrado en empresas como Texas Instruments, Xerox, Schlumberger, Hewlett-Packard, General Motors y otras. Universidades como Stanford, Carnegie-Mellon, Maryland y el Instituto Tecnológico de Massachusetts continúan en el desarrollo de la tecnología en sistemas expertos. En estos centros se han instrumentado y desarrollado otros lenguajes de programación que se utilizan en sistemas expertos, como el InterLISP, MacLISP, IQ-LISP, FranzLISP, Prolog, OPS-5, PLANNER y UNITS (8).

Conforme a las aplicaciones de las ideas de inteligencia artificial en sistemas expertos a través de los años, se han aprendido dos habilidades principales. La primera es que un sistema experto debe ser rico en conocimientos para trabajar

(8) Meyer, R. 1987. Encyclopedia of physical science and technology. Ed: Academic Press. pag. 19.

satisfactoriamente, aun cuando su metodologia sea deficiente. La segunda es que el conocimiento de un especialista se basa en gran parte en la heuristica e incertidumbre. Por lo tanto, un sistema experto debe ser capaz de manejar la incertidumbre, y debe poder construir una "explicacion" para que el usuario pueda entender la forma en que se llego a la conclusion o solucion (9).

Algunas companias han desarrollado sistemas expertos generadores, que se utilizan como ayuda para la construccion de otros sistemas expertos. Estan surgiendo nuevas companias relacionadas con la inteligencia artificial. Tambien se han desarrollado diferentes "dialectos" de LISP para inteligencia artificial, por ejemplo Franz LISP, Mac-LISP, InterLISP, e IQ-LISP, los cuales tienden a complementarse unos con otros para lograr una estandarizacion. Otro lenguaje especifico para inteligencia artificial es el Prolog (Programacion Logica - Programming in Logic), el software para la programacion basada en la inferencia se apoya en los estudios sobre programacion logica, la cual esta actualmente representada por este lenguaje (10) (11) (12). Los gobiernos de diferentes paises tambien tienen

-
- (9) Naylor, C.A. 1983. Build your own expert system.
London: International. pbg. 207.
- (10) Bishop, P. 1984. Fifth generation computers.
London: Ellis Horwood Limited. pbg. 25.
- (11) Roberts, R. 1987. The power of LISP Prolog.
Ed: JDB Books. pbg. 84.
- (12) Wellcamp, Z. 1988. Programming with LISP Prolog.
Ed: John Wiley and sons. pbg. 56.

investigaciones dentro del area de la inteligencia artificial, tal es el caso del Proyecto Computacional de los Estados Unidos de Norteamérica (Computing Project), el Proyecto Computacional de la Quinta Generación del Japon, el proyecto Alvey de Gran Bretaña, y el Proyecto Europeo Estrategico para la Investigación en Tecnología Informática (European Strategic Program for Research in Information Tecnology, ESPIRIT) (13).

A principios de los setentas, emergió un nuevo paradigma en la investigación de la inteligencia artificial el cual ha tenido énfasis en el uso del "conocimiento" asociado a un problema como el principal recurso para su resolución. Este énfasis se ha dirigido a muchas aplicaciones de los sistemas expertos en una gran variedad de campos del conocimiento.

La resolución a problemas generales es uno de los primeros conceptos en inteligencia artificial, esta resolución se realiza mediante una búsqueda selectiva. Este es un concepto importante que distingue a la inteligencia artificial de otras técnicas de resolución de problemas. La investigación en inteligencia artificial se refiere a un gran conjunto de ideas relacionadas con la deducción, la inferencia, la planeación, el sentido comun razonado, la comprobación de teoremas y procesos que se apoyan en la manipulación de símbolos para guiar el proceso de resolución de un problema. Esto difiere de los problemas numericos, ya que

(13) MacCallum, B. 1988. Expert system programming with turbo pascal. Ed: Prentice Hall. pag. 36.

la trayectoria de solución no se basa en un algoritmo matemático. Mas aun, la solución a un problema es obtenida por búsqueda y combinación de todas las ideas usuales o pistas disponibles, cada una de las cuales contribuye a la obtención de la solución final (14). Hay diferentes conceptos importantes en el desarrollo eficiente de los procesos de investigación:

HEURISTICA

La heurística es una regla de manejo o estrategia que puede ser usada para solucionar problemas determinados en base a la experiencia, surge a partir de ésta. A diferencia del algoritmo, esta regla proporciona una buena aproximación para resolver el problema la mayoría de las veces. La programación heurística por lo tanto, se refiere a la actividad de desarrollar programas capaces de resolver problemas en base a la experiencia.

TÉCNICAS DE RAZONAMIENTO

Existen dos formas generales de obtener una solución a un problema determinado. Ambas consideran a la solución como una meta y a los datos disponibles como un punto de partida. Entre

(14) Newson, W. 1985. op. cit. pág. 49.

estos dos extremos se localiza el problema. Estas técnicas se describirán mas adelante en este capítulo. Las técnicas de razonamiento hacia adelante y hacia atrás también pueden ser combinadas para encontrar una solución de manera más eficiente, esta combinación se ha desarrollado y usado en muchos sistemas expertos.

Los primeros programas para solución a problemas generales que utilizaron la combinación de los conceptos discutidos anteriormente, fueron los desarrollados por Newell, Shaw y Simon en 1956 para probar teoremas en lógica. Los mismos autores mas tarde desarrollaron el Sistema de Resolución a Problemas Generales (General Problem Solver) con la finalidad de separar las técnicas de resolución de problemas a partir del conocimiento específico de los mismos. En esta investigación se desarrollaron muchas de las reglas heurísticas, estrategias de control, y métodos de razonamiento mas comunes (15).

REPRESENTACIÓN Y ADQUISICIÓN DEL CONOCIMIENTO

Para que una computadora tenga la habilidad y actúe "inteligentemente" es necesario que cuente con el conocimiento pleno sobre el problema a resolver, esto incluye no sólo hechos

(15) Newell, J. 1959. op. cit. pág. 127.

asociados con el dominio, sino también la experiencia, reglas y juicios desarrollados por los expertos (16). Por lo tanto, es fundamental la forma de representar el conocimiento en la computadora, así como la forma en que ésta lo adquiere.

REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

Existen diferentes métodos generales para la representación del conocimiento. Una es el uso de la lógica formal, que permite que las partes del conocimiento sean representadas en forma lógica. Otro método es el sistema basado en reglas. En esta representación, cada parte del conocimiento se describe en términos de reglas de tipo SI-ENTONCES (IF-THEN), donde la parte del SI contiene la(s) condición(es) para ese hecho, y la parte del ENTONCES es la(s) conclusión(es) obtenida(s) o acción(es) que debe(n) ser tomada(s). Este método de representación es más natural y claro para el usuario por lo que es uno de los más comunes en la actualidad. Otro método para la representación incluye formas de describir objetos, sus atributos y relaciones en forma de diagramas o estructuras de tipo árbol o en forma gráfica, similar a una red semántica conveniente para el almacenamiento de relaciones y significados. Muchos de los sistemas comunes en inteligencia artificial utilizan una combinación de métodos para representar varias formas de conocimiento.

(16) Newson, W. 1985. op. cit. pág. 49.

ADQUISICIÓN DEL CONOCIMIENTO

La mayoría de los investigadores en el campo de la inteligencia artificial consideran que la adquisición del conocimiento es el obstáculo común para el progreso de la inteligencia artificial. Para una tarea en particular se debe contar con un mínimo de conocimientos; por lo tanto, la captura de estos está totalmente asociada a la experiencia humana, que en muchos casos es todavía un arte, por lo que se requiere de gran creatividad para cada tarea. Existen diversas razones para afirmar esto: primero, el ingeniero del conocimiento, uno de los "artesanos", debe trabajar con expertos en el dominio, quienes pueden tener una estructuración completamente diferente del conocimiento acerca de una tarea específica; segundo, en la transferencia y codificación del conocimiento proporcionado por los expertos a la máquina, frecuentemente resultan errores no detectados y tendencias; tercero, pueden existir diferencias o contradicciones en los puntos de vista dados por diferentes expertos para cierta parte del conocimiento. Debido a estos problemas, la adquisición del conocimiento es uno de los aspectos más importantes en las investigaciones de inteligencia artificial para cuestiones relacionadas con el desarrollo de mejores herramientas apropiadas para la transferencia del conocimiento, programas que pueden eventualmente "aprender" nuevas partes del conocimiento, y métodos rigurosos para verificar la integridad del mismo.

CENCIA COGNOSCITIVA

La ciencia cognoscitiva emerge de una forma interrelacionada con la inteligencia artificial, desde sus orígenes. Muchas investigaciones en inteligencia artificial consideran a la ciencia cognoscitiva como una parte de la misma, dirigida a desarrollar una teoría acerca de la forma en que los humanos organizan y usan el conocimiento para resolver problemas complicados.

La ciencia cognoscitiva es, en este caso, un medio para alcanzar la meta. Lo que la ciencia cognoscitiva puede decirnos sobre la inteligencia humana puede servir bien como un tipo de "ingeniería asintótica" de la inteligencia artificial, no necesariamente al alcance en cuanto a la teoría, pero si realizada en forma arbitraria cercana a la práctica.

COMPONENTES DE UN SISTEMA EXPERTO

Un sistema experto consta de tres componentes fundamentales, descritos a continuación: estructura de diálogo, motor de inferencia y base de conocimiento (17).

(17) MARRASOFF, W. 1986. op. cit. pág. 84.

ESTRUCTURA DE DIALOGO

Esta estructura sirve como interfase, por medio de la cual el usuario puede acceder al sistema experto. Generalmente el usuario interactúa con el sistema mediante un módulo consultativo, también se incluye un módulo explicativo, que permite al usuario cuestionar al sistema y examinar su proceso de razonamiento. En otros sistemas expertos, dependiendo de su estructuración y finalidad, se incluye un "Programa Generador de Informes", que ayuda al usuario final a elaborar informes, quien especifica los datos contenidos y el formato requerido, cuando es ejecutado obtiene los datos necesarios y los presenta conforme al formato especificado. De acuerdo a Michie hay tres niveles de uso de un sistema experto (18):

1. Nivel de usuario como cliente - Se obtienen respuestas a problemas.
2. Nivel de usuario como tutor - Se incrementa o mejora el sistema de conocimiento.
3. Nivel de usuario como alumno - Se toma la base de conocimiento para uso didáctico.

Cada uno de estos niveles requiere una interacción lograda mediante la estructura de dialogo. Esta interacción todavía requiere que los usuarios adapten su forma de pensar a la

(18) Frost, R. 1989. Basas de Datos y Sistemas Expertos.
España: Diaz de Santos. pag. 96.

estructuración establecida en la computadora. La tendencia es alcanzar un nivel en el que la estructuración establecida en la computadora se adapte a la forma de pensar del usuario, lo cual se pretende lograr mediante interfases inteligentes del usuario como se muestra en la figura 3.1

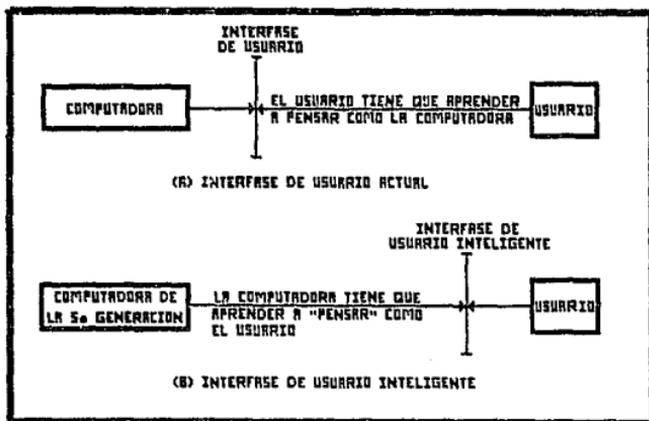


Figura 3.1 Interfases (19)

(19) *Baskop, P. 1984. op. cit. pág. 47.*

MOTOR DE INFERENCIA

Consiste de un programa que permite que se genere una hipótesis en función de la información de la base de conocimiento. En particular, se basa en métodos mediante los cuales la computadora: a) puede reconocer contradicciones en determinado contexto, y b) puede deducir conocimiento nuevo que deriva del conocimiento anterior (20). Existen principalmente tres técnicas incorporadas en el motor de inferencia para llegar a una solución con el fin de hacer más eficiente la búsqueda en un espacio para derivar hipótesis a partir de la base de conocimiento: encadenamiento hacia adelante, encadenamiento hacia atrás y encadenamiento combinado.

Encadenamiento hacia adelante

El encadenamiento hacia adelante, frecuentemente descrito como "razonamiento dirigido por eventos", es usado para resolver problemas cuando los datos o ideas básicas están en el punto inicial. Bajo este método el sistema no comienza con ninguna meta particularmente definida. De acuerdo con Weiss y Kulikowski (21):

-
- (20) Newsted, 1987. Introduction to Artificial Intelligence.
Wd: Chemical Engineering Progres. pg. 27.
- (21) Rowman, G. 1984. Practical Guide to Designing Expert Systems.
Wd: Academic Press. pg. 89.

"Esto significa que inicialmente no existe un subgrupo de reglas de producción que establezcan un punto de partida. En lugar de esto, el sistema comienza con un subconjunto de evidencias y procedimientos para generar la producción de reglas en una dirección hacia adelante, continuando hasta que ya no se puedan generar más reglas".

En este caso se lleva al problema desde la configuración inicial hasta el objetivo final, es decir que el objetivo principal necesita ser construido, esto sucede porque el número de soluciones posibles es grande. Las premisas son examinadas para analizar si son verdaderas, proporcionando información o reteniéndola. En el primer supuesto, las conclusiones se añaden a la lista de hechos verdaderos como se muestra en la figura 3.2.

Una posible desventaja del encadenamiento hacia adelante es que se dirijan todas las posibilidades sin importar si son o no necesarias. Este encadenamiento ha sido usado en sistemas expertos para análisis de datos, diseño, diagnóstico y formación de conceptos.

Encadenamiento hacia atrás

El encadenamiento hacia atrás, frecuentemente descrito como "razonamiento con meta dirigida", supone una meta o hipótesis como punto de partida y entonces "trabaja hacia atrás" a lo largo

de algunas trayectorias para verificar si la conclusión es verdadera. En el encadenamiento hacia atrás, el sistema, como lo establece Weiss y Kulikowski (22):

..."tiene un conjunto de metas iniciales, y las reglas se derivan en sentido hacia atrás. El sistema empieza examinando un conjunto limitado de reglas de producción, que consecuentemente son las metas. El sistema entonces procede a examinar los antecedentes de las reglas para ver cuales de las metas o consecuencias se satisfacen. Ya que las reglas son examinadas en esta deducción hacia atrás, algunas premisas, de los antecedentes de las reglas, son desconocidas y lógicamente no satisfechas, por lo tanto comienzan a ser nuevas submetas. Si una submeta es desconocida, el sistema puede hacer una pregunta para determinar su situación".

En este caso se empieza por el objetivo final y se trabaja hacia atrás a través de objetivos particulares para elegir una respuesta, es decir que se parte del objetivo, el cual se transforma en sub-objetivos (sub-problemas), el proceso continúa hasta que los sub-objetivos se han resuelto o reducido hasta los datos disponibles como se muestra en la figura 3.3 Si es posible conocer los resultados y estos son razonablemente pequeños en número, entonces este método es adecuado.

(22) Roman, A. loc. cit.

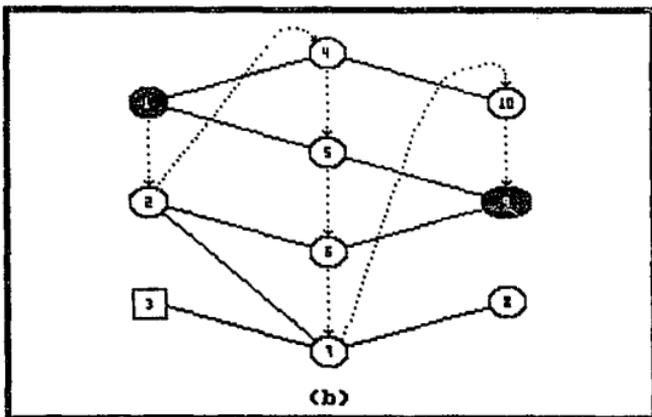


Figura 3.2b Encadenamiento hacia adelante (anchura)

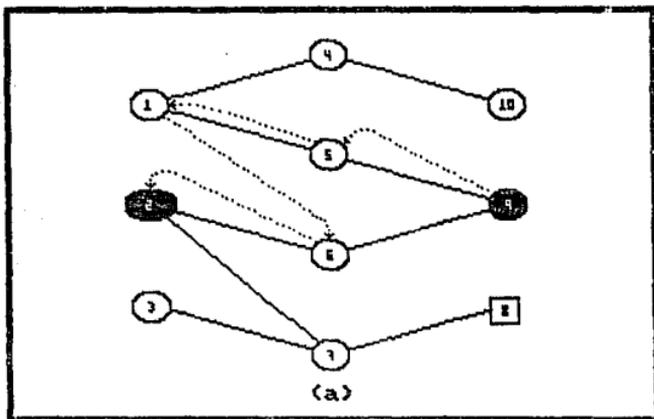


Figura 3.3a Encadenamiento hacia atrás (profundidad)

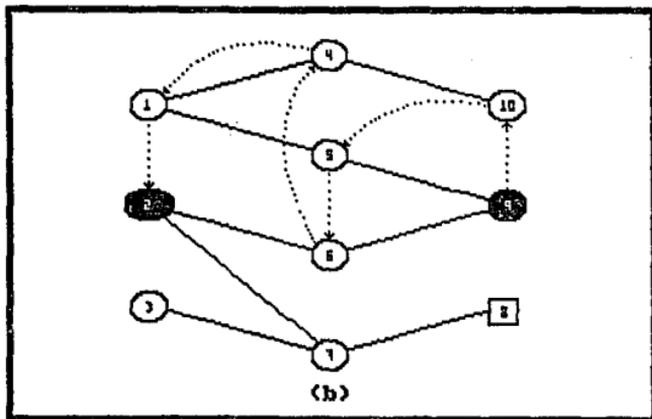


Figura 3.3b Encadenamiento hacia atrás (anchura)

Encadenamiento combinado

La combinación del encadenamiento hacia adelante y hacia atrás es una técnica usada para la búsqueda en grandes espacios, se debe realizar desde el fondo hacia arriba y desde lo más alto hacia abajo (24). Este tipo de búsqueda es aplicable a problemas complejos que incorporan incertidumbre, como es el caso de los sistemas de entendimiento del lenguaje hablado.

(24) Yang, T. y Olsen, D. 1991. A Diagnostic Expert System for Helping the Operation of Nagardom Waste Incinerators. UdA: Journal of Nagardom Materials. pág. 29.

Existen otras técnicas que pueden ser construidas dentro del motor de inferencia para espacios grandes de búsqueda y encontrar transformaciones de espacio de búsqueda.

Los motores de inferencia tienen algunas capacidades para las aproximaciones de búsqueda espacial antes mencionadas, y la mayoría de ellas también tienen la habilidad de razonar en presencia de incertidumbre.

En cuanto al aprendizaje, existen dos formas generales, el deductivo, en el que el conocimiento específico se deduce de reglas generales. Y el inductivo, en el que se infieren reglas generales de ejemplos específicos.

El lenguaje Prolog cuenta con un enfoque especial: forma una base de conocimiento a partir de las asociaciones entre elementos de información y reglas de inferencia que operan con estas asociaciones e incluye un mecanismo general de prueba de teoremas para controlar la aplicación de las reglas a las asociaciones. Es por eso que el uso de este lenguaje facilita la realización de sistemas expertos ya que cuenta con su propio motor de inferencia.

BASE DE CONOCIMIENTO

Este es el último y más importante componente de un sistema experto, esta compuesta de hechos del dominio y reglas basadas en la experiencia. De acuerdo con Richard Duda (25), el sistema

(25) Duda, R. y Shortliffe, E. 1983. Expert Systems Research.
Wad: Science. pag. 266.

experto más poderoso es el que contiene la mayor cantidad de conocimientos.

Existen cuatro formas principales de representación en la base de conocimiento. La primera se basa en el significado de predicados, esto es, comprende la representación declarativa de hechos.

La segunda aproximación para la representación del conocimiento es el uso de estructuras, como el sistema desarrollado por Marvin Minsky (1975) (26). En estas estructuras de datos, se almacena todo el conocimiento acerca de un ente en particular. Cada estructura contiene un número de cuadros en varios niveles, los cuales pueden estar en blanco o estar especificados por terminales referidas a otras estructuras. Esto permite que el conocimiento sea organizado en forma modular y por accesibilidad.

Intentos para diseñar formas generales de organización de conocimiento basadas en el concepto de estructuras fueron hechos por Bobrow y Winograd (27) mediante el lenguaje de representación del conocimiento. Roberts y Goldstein (28) a través de la representación por estructuras, de tipo especial, "script", que contiene varias escenas para ser representadas en una estructura de tipo orientación.

(26) FALSA, R. 1989. op. cit. pág. 94.

(27) BAWALDIA, B. 1987. op. cit. pág. 31.

(28) ROBERTS, R. 1987. op. cit. pág. 114.

La tercera y más cercana aproximación al concepto de estructura, es el uso de la semántica o redes asociativas. Las redes semánticas contemplan el conocimiento como un conjunto de asociaciones entre objetos, los objetos se representan como nodos de la red y las asociaciones como líneas que enlazan a los nodos. De acuerdo con Dana Nau (29), bajo este método el conocimiento se organiza alrededor de los objetos descritos. Los objetos son representados por nodos en una gráfica y las relaciones a su alrededor son representadas por arcos o eslabones entre los nodos. La principal ventaja de las redes semánticas sobre la representación lógica es que para cada objeto, se obtiene conjuntamente toda la información relevante. La figura 3.4 ilustra una red semántica que representa las siguientes asociaciones:

- * Juan es estudiante, juega futbol y le gusta la música clásica.
- * Elena es empleada, le gusta el futbol y la música clásica.
- * José es empleado, juega futbol y no le gusta la música clásica.

La última y principal forma de representación en la base de conocimiento es el uso de reglas de producción, que fue popularizado por Newell y Simon en 1972 (30) y por Davis y King en 1975 (31). Las reglas de producción toman la forma: IF

(29) Nauman, W. 1985. op. cit. pág. 51

(30) Maynard, R. 1987. op. cit. pág. 14

(31) Rusch Elaine. 1983. op. cit. pág. 73

(antecedente) THEN (consecuencia) o SITUACION-ACCION (32). Esto ha sido usado extensivamente en sistemas expertos, particularmente en los usados para diagnóstico y planeación.

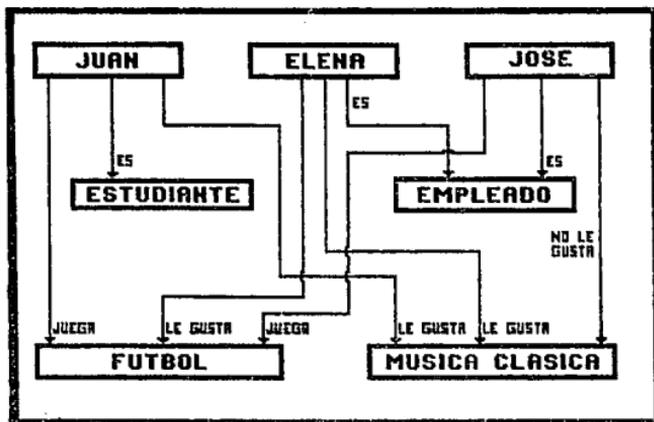


Figura 3.4 Ejemplo de red semántica (33)

Debe reconocerse por lo tanto que un aspecto fundamental para el desarrollo de los sistemas expertos continua siendo la necesidad de una selección efectiva de la base del conocimiento predispuesta, que es impartida por el particular y exclusivo punto de vista (valor jerarquizado) de los expertos, quienes son el recurso de lo que constituye la base de conocimiento (34).

(32) Zeimbndeq, J. 1989. op. cit. pág. 124.

(33) Zeimbndeq, J. loc. cit.

(34) Naylor, CA. 1983. op. cit. pág. 212.

CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA EXPERTO

El tiempo que se requirió para la construcción de los primeros sistemas expertos varia entre 20 y 25 años. Recientemente, algunos sistemas expertos simples se han podido construir en 3 meses, pero un sistema experto complejo puede requerir de muchos años para ser completado. El tiempo de desarrollo puede ser disminuido considerablemente por el uso de nuevas herramientas como es el caso de los sistemas expertos generadores, que serán discutidos mas adelante.

El primer paso en la construcción de un sistema experto es la selección del problema, la definición de la(s) meta(s) del sistema experto y la identificación de los recursos del conocimiento. Para ello se debe contar con un buen dominio de aplicaciones para evitar la explosión combinatoria (35). Adicionalmente debe tenerse la disponibilidad de por lo menos un experto.

Una vez que este paso se ha cubierto, el siguiente es adquirir el conocimiento del experto para desarrollar la base de conocimiento, es de mucha ayuda la representación esquemática mediante un diagrama de trabajo para representar la información adquirida. La adquisición del conocimiento es un proceso

(35) Goskoph, P. 1984. op. cit. pag. 127.

iterativo, en el cual se requiere una comunicación continua con el experto para obtener toda la información relevante y necesaria para la base de conocimiento, en la figura 3.5 se presenta una estructura generalizada para la construcción de un sistema experto.

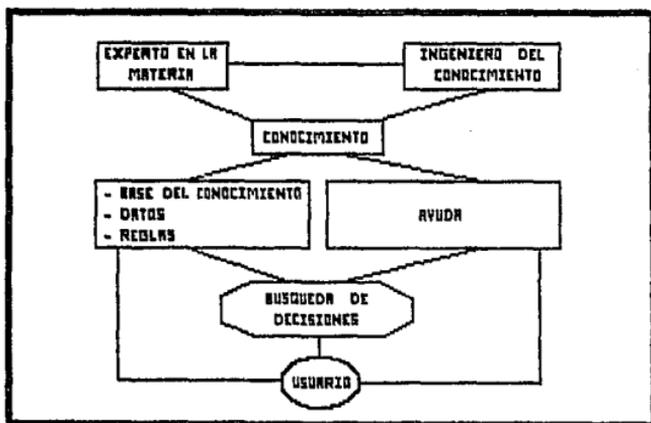


Figura 3.5 Construcción de un sistema experto (36)

Una vez que se ha adquirido el conocimiento, el siguiente paso es la representación del mismo. Esto incluye el uso del cálculo de predicados, estructuras, redes semánticas o reglas de

(36) Mayford, CA. 1983. op. cit. pag. 225.

producción, como se describió en la sección anterior. Conforme a la Software Architecture & Engineering, Inc., la deducción basada en reglas es un método apropiado para la representación del conocimiento si:

1. El conocimiento prioritario está organizado en forma de reglas.
2. El tipo de clasificación es predominantemente categórico.
3. No existe una gran dependencia en el contexto.

Las estructuras o redes semánticas son muy útiles cuando el conocimiento preexiste como una descripción.

El siguiente paso se refiere a la programación del conocimiento mediante el uso de un editor de texto en un sistema experto generador o mediante el uso del LISP, Prolog, o algún otro lenguaje de programación apropiado (37) (38). Finalmente, el último paso puede ser la revisión por comprobación y evaluación del sistema experto.

Esta revisión es necesaria para dar validez al sistema experto y a la base de conocimiento como un todo. La comprobación se puede hacer utilizando resultados de problemas anteriores o mediante la revisión directa hecha por otros expertos en el área del problema.

(37) Gans, P. 1987. Development Tools Aid in Building Expert Systems. Ed: Intel. pág. 13.

(38) Medsker, J. 1987. Artificial Intelligence and Prolog on Microcomputers. London: Academic Press. pág. 70.

Después que se ha realizado el refinamiento y mantenimiento del conocimiento, se puede hacer una evaluación del sistema experto por usuarios que trabajen comúnmente en el área del problema. Este proceso de evaluación tiene la finalidad de ver si el sistema experto cumple con los objetivos para los que fue creado.

LOS SISTEMAS EXPERTOS APLICADOS COMO GENERADORES

Como se mencionó anteriormente, la construcción de un sistema experto a partir de cero puede requerir de varios años de trabajo. Para reducir el tiempo de desarrollo y los costos, se han creado varios sistemas expertos empleando sistemas expertos generadores, conocidos como "shell systems" (39). Un sistema experto generador contiene una estructura generalizada de diálogo y un motor de inferencia.

Se puede diseñar una base de conocimiento para un dominio específico y encadenarla al sistema experto generador formando así un nuevo sistema experto para una aplicación particular (40).

En la segunda parte de los ochentas la tecnología de los sistemas expertos ha tenido rápidas transformaciones, gracias a los sistemas expertos generadores, que dan a los usuarios la

(39) Baum, P. 1987. op. cit. pág. 14.

(40) Finn, V. 1987. Rules of Thumb for Implementing Expert Systems in Engineering. Vid: Intech. pág. 34.

posibilidad de crear sistemas expertos sin tener gran experiencia en programación. En 1986 se consideró que cerca del 85% de los sistemas expertos creados en los Estados Unidos de Norteamérica se basaron en algún sistema experto generador; es difícil hacer mención de la magnitud del uso de sistemas expertos en general, pero se puede tener una idea al considerar que en 1985 las ventas de sistemas expertos generadores fueron de alrededor de 16500 unidades con un valor de 12.5 millones de dólares (41). Algunos de los sistemas expertos generadores comerciales se presentan en la tabla I del apéndice A.

Cada día se captura y perfecciona la estructuración de más y más conocimiento con sistemas expertos generadores, aunado a esto, están saliendo al mercado los "super-shells", que contienen ya una gran parte de la base de conocimiento para determinada área de aplicación, principalmente en finanzas y algunas áreas de la ingeniería (42).

APLICACIONES DE LOS SISTEMAS EXPERTOS

La actividad en el desarrollo de sistemas expertos se incrementa continuamente en empresas y universidades de varios países. Japón lanzó su proyecto computacional "Quinta Generación"

(41) Baum, P. loc. cit.

(42) Basford, J. y Willenkamp, V. (editores). 1991. Expert Systems in Production and Services I. Impact on Qualifications and Working Life. Holanda: Elsevier Science Publishers. pág. 57.

en abril de 1982 (43). Este plan consiste en el desarrollo e implementación de ideas en ingeniería del conocimiento, sistemas de resolución de problemas e inferencia, interfaces inteligentes y máquinas de procesamiento lógico.

En los Estados Unidos de Norteamérica, el gobierno ha sido originalmente el principal proveedor de fondos para el trabajo en sistemas expertos. Las agencias del gobierno más activamente involucradas son: Agencia de Investigación en Proyectos Avanzados para la Defensa, Instituto Nacional de Salud, Fundación Nacional para la Ciencia, Oficina para la Investigación Naval, Biblioteca Nacional de Medicina, Oficina de la Fuerza Aérea para la Investigación Científica, Inspección Geológica de los Estados Unidos, Centro Naval para la Investigación en Inteligencia Artificial, y la Administración Nacional para la Aeronáutica y el Espacio.

La Universidad de Stanford, el Instituto Tecnológico de Massachusetts, y la Universidad Carnegie-Mellon son algunos de los líderes en el desarrollo de sistemas expertos en el ámbito académico. Las siguientes compañías: Bell Labs, Computer Thought, Fairchild, General Motors, Hewlett-Packard, Hughes, Intellicorp, JAYCOR, Machine Intelligence Corp., Martin-Marietta, Schlumberg, Smart Systems Technology, Systems Control Inc., Texas

(43) *J. Ann. N. Soc. Ed.*

Instruments y Xerox, son algunas de las principales impulsoras de esta tecnología (44).

La función de la mayoría de los sistemas expertos existentes cae en una de las categorías siguientes: diagnóstico, análisis de datos, análisis de fallas para equipos especiales, planeación, diseño, formación de conceptos, monitoreo, adquisición de conocimiento, instrucción asistida por computadora, tutorío, administración, programación automática o entendimiento de imagen (45). La tabla II del apéndice A, muestra varios de los sistemas expertos existentes. Cada día se sugieren nuevas aplicaciones; por ejemplo, el TAXADVISOR y el TAXMAN se han desarrollado para ayudar a consejeros legales en materia de impuestos. Otro sistema experto, desarrollado por la NASA está relacionado con funciones tales como la ayuda en la planeación y análisis de naves espaciales y el incremento de la calidad y firmeza de los datos para imágenes.

VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS SISTEMAS EXPERTOS

Los sistemas expertos ofrecen nuevas formas de codificar y emplear el conocimiento para resolver problemas. Son aproximaciones mejoradas para la formalización y manipulación del

(44) Hayes, R. 1987. op. cit. pag. 21.

(45) Reinold, T. y Willenkamp, U. (editores). 1991. Expert Systems in Production and Services II. Woland: Elsevier Science Publishers. pag. 74.

conocimiento, lo que anteriormente se pensó imposible de organizar formalmente. Las aplicaciones de los sistemas expertos han mostrado que los programas pueden operar al nivel o a un nivel muy cercano al de los humanos expertos. Esto es una ventaja, particularmente en casos donde se requiere de un experto pero no se cuenta con él debido a los altos costos; falta de expertos humanos y restricciones de tiempo. Un sistema experto puede ser usado como soporte y verificación de la opinión de un experto humano y también en situaciones en las que un individuo puede fácilmente aturdirse debido a presiones de tiempo o medidas de tipo restrictivo, el conocimiento del experto se "almacena", por lo que si el experto deja el empleo su conocimiento se conserva. Otras ventajas son (46):

- Conservan el conocimiento práctico (know-how) y en ocasiones lo mejoran, por lo que el usuario puede hacer alguna tarea sin tener un conocimiento detallado de la misma.
- Mediante su uso se pueden resolver problemas que antes no era posible pretenderlo debido a su complejidad.
- Las especificaciones y la documentación en procesos de producción pueden ser mejor organizadas y evaluadas.

(46) Zein, K. y Waddas, A. d. 1987. The Expert Systems Technology. Ed: Chemical Engineering Science. pág. 105.

Así como hay ventajas en el uso de sistemas expertos también existen limitaciones. Primera, en el proceso de adquisición de conocimiento, por ejemplo, el proceso de aprendizaje es el principal limitación de un sistema experto. Si bien los programas de computadora son lo suficientemente hábiles para hacer análisis, la mayoría no pueden aprender a partir de la experiencia. Segunda, hay un problema potencial en la forma en que se realiza la generalización y especificación en forma simultánea. Esto conduce a la dificultad de la explosión combinatoria de los espacios de búsqueda, los cuales actualmente son manejados por la activación del sistema de resolución para operar solo dentro de un límite, el contexto específico. Tercera, existe la dificultad de simplificar y/o corregir, los programas que tienen gran cantidad de conocimiento. Cuarta, el sistema experto debe ser capaz de incorporar automáticamente las entradas de información nueva, proporcionada por varios expertos, en lugar de tener uno solo como recurso de conocimiento. Quinta, debido a que esta área es relativamente nueva existen muy pocos ingenieros del conocimiento, quienes se responsabilicen de la adquisición, representación y programación del conocimiento experto. Sexta, la estructuración, el dominio y la profundidad del conocimiento son obstáculos que no se han superado del todo, a pesar de muchos intentos. Séptima y última, el sentido común en los sistemas expertos no puede ser implementado.

SISTEMAS EXPERTOS E INDUSTRIA QUIMICA

Aun cuando las computadoras se han usado para supervisar procesos quimicos por más de una década, los procesos de control son manuales fundamentalmente. Las computadoras se usan para:

- simulación y análisis de procesos
- obtención de diseño y costos de equipo
- diseño para redes de tubería
- integración de sistemas de distribución de energía
- planeación de proyectos
- monitoreo

Pero estos sistemas "no saben" cómo se hace el diseño y no pueden contestar a preguntas como ¿desde dónde comenzar el diseño? ¿qué hacer después? ¿qué simplificaciones y consideraciones se deben hacer para proseguir? Las estructuras y métodos de diseño dependen de la experiencia del diseñador.

Los científicos e ingenieros involucrados en el desarrollo de nuevos productos; por ejemplo, materiales, solventes, sustancias especiales; o en la evaluación comercial de las alternativas no utilizan computadoras en aspectos creativos, excepto para almacenar datos y cálculos triviales. Consecuentemente, la experiencia acumulada, frecuentemente vital para las compañías, es muy difícil de organizar sistemáticamente, por lo que su utilidad depende del individuo que la posea.

Esta situación comienza a cambiar con el advenimiento de sistemas computacionales de menor precio y mas poderosos, asi como de softwares, basados en la inteligencia artificial. Importantes empresas quimicas han establecido grupos para el desarrollo de la tecnologia de los sistemas expertos, tal es el caso de Dupont, Shell, Chevron, Amoco, SunOil, Air Products, Dow, Procter and Gamble, Union Carbide, General Electric, Mobil, 3M, ICI, y BASF (47) (48).

Asimismo, las universidades han considerado este enfoque particular, un ejemplo es el "Laboratorio de Sistemas Inteligentes para Procesos de Ingenieria" (LISPE - Laboratory for Intelligent Systems for Process Engineering) establecido en el Instituto Tecnologico de Massachusetts en 1986 (49).

La industria quimica, como la mayoría de las industrias que necesitan para su trabajo del conocimiento de expertos, cuya formación es costosa, ha desarrollado varios sistemas expertos como herramientas de trabajo, investigación o ayuda en el uso de maquinaria o instalaciones complejas. A continuación se hace mención de algunos sistemas expertos sobresalientes en este campo:

(47) Puente, G. y Puente, Pilar. 1989. Sistemas Expertos e Industria Quimica. España: Ingeniería Quimica. pag. 125.

(48) Stephanopoulos, V. 1987. The future of Expert Systems in Chemical Engineering. Uda: Chemical Engineering Progress. pag. 48.

(49) Sarkis, M. et. al. 1990. Rationalizing Tool selection in a Flexible Manufacturing System for sheet-metal Products. Uda: Operation Research. pag. 1109.

DENDRAL

Este sistema fue desarrollado por Feigenbaum y Lederberg (este último premio Nobel de Química) en la Universidad de Stanford en 1965 (50). A partir de este sistema surgieron nuevos e importantes conceptos en inteligencia artificial. Sirve para determinar estructuras moleculares a partir del gráfico suministrado por un espectómetro de masas. Este sistema se describe en la figura 3.6

El planificador interpreta el histograma generado por el espectómetro haciendo uso de las reglas de conocimiento. Como resultado de la aplicación de dichas reglas, se generan dos listas: la correcta e incorrecta, las cuales contienen los grupos químicos que forman parte de la estructura y los que quedan excluidos, con lo que se ayuda al programa generador de posibles estructuras moleculares (CONGEN) a limitar la búsqueda entre todas las posibilidades.

CONGEN es un programa interactivo que permite al usuario introducir datos o hipótesis de la estructura en cualquier momento. A partir de esta información y de las dos listas mencionadas, CONGEN genera las posibles estructuras del compuesto que son analizadas en la siguiente fase (etapa de prueba), compuesta por los programas MSPRUNE y MSRANK, que

(50) Feigenbaum, J. 1989. op. cit. #pg. 127.

comprueban la concordancia de los histogramas generados por CONGEN con el histograma de partida del espectrómetro de masas. Como resultado de esta última etapa, DENDRAL proporciona como "estructuras propuestas" aquellas cuyos espectros simulados coincidieron con el real.

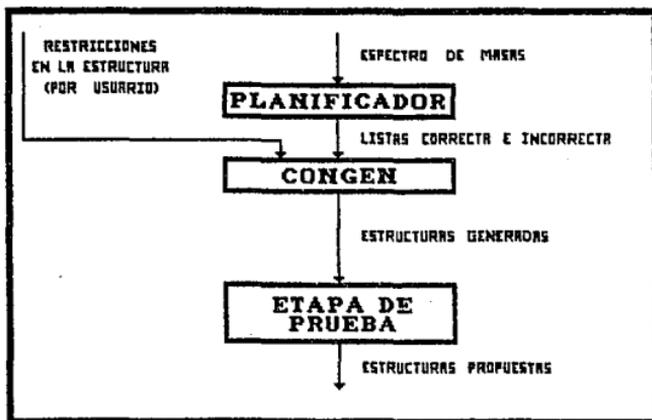


Figura 3.6 Esquema del sistema DENDRAL (51)

A partir de DENDRAL se han desarrollado otros sistemas expertos para aplicaciones en química, los más significativos están incluidos en los tres grupos de actividades siguientes:

- A) Analisis de estructuras,
- B) sintesis de estructuras,
- C) ayuda en la planeación de experimentos.

(51) Feenbinder, loc. cit.

ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS MOLECULARES

M E T A D E N D R A L

Se usa para determinar estructuras moleculares a partir del espectro de resonancia magnética nuclear (RMN). Su estructura se compone de las tres etapas del DENDRAL: planificación, generación y prueba.

La diferencia fundamental es que en este caso se generan reglas de segmentación de la estructura molecular por el bombardeo experimental de electrones. Para lo cual METADENDRAL infiere estas reglas a partir de los espectros obtenidos de compuestos con estructura tridimensional bien conocida.

C - 1 3

Determina la disposición de los átomos y sus uniones en moléculas orgánicas complejas a partir del espectro de resonancia magnética nuclear del carbono ¹³. La base de conocimiento tiene reglas concernientes a características subestructurales (uniones) y espectrales (resonancia). Su estructura es similar a la del DENDRAL, con las tres etapas ya mencionadas.

C R Y S A L I S

Infiere la estructura tridimensional de una proteína a partir del mapa de densidad electrónica (MDE). El sistema interpreta los datos de la difracción de rayos X, obtenidos a partir de la posición e intensidad de las ondas difractadas al actuar sobre la estructura atómica. La base de conocimiento está formada por conocimientos sobre la composición de la proteína y sobre la cristalografía de rayos X, así como por reglas heurísticas para el análisis del mapa de densidad electrónica. Su funcionamiento se basa en el método de generación y prueba de estructuras hipotéticas.

G A - 1

Analiza la estructura de las moléculas del ADN a partir de los datos de segmentación enzimática restringida. La base de conocimientos del GA-1 contiene reglas sobre los mecanismos involucrados en las estructuras de las enzimas del ADN, así como conocimientos basados en pruebas de laboratorio. Utiliza la misma estructuración que el DENDRAL, generación y prueba de las posibles estructuras del ADN, pero permitiendo un grado de tolerancia, ajustable por el usuario, en concordancia con la fase de prueba.

SÍNTESIS DE ESTRUCTURAS MOLECULARES

O C S S

Asiste al químico en la síntesis de moléculas orgánicas complejas. El sistema analiza las moléculas objeto de estudio, reconociendo grupos funcionales, cadenas, anillos, redundancia y simetrías en la configuración molecular, aplicando transformaciones químicas a dichas estructuras, y evaluando las estructuras resultantes.

S E C S S

Ayuda al químico en la síntesis de moléculas orgánicas complejas. El sistema analiza la molécula de estudio y genera un plan para construirla a partir de bloques moleculares elementales. Dicho plan es esencialmente una serie de reacciones químicas aplicadas a grupos funcionales de átomos. El sistema trabaja básicamente en una búsqueda hacia atrás, desde la estructura final hacia estructuras moleculares más sencillas, hasta que determina un camino para la síntesis.

SYNCHEM-1 y SYNCHEM-2

Estos dos sistemas tienen como finalidad la planeación de síntesis de moléculas orgánicas complejas sin la intervención y ayuda del usuario. La base de conocimiento contiene información

sobre las reacciones químicas que les permiten generar un plan para determinar la molécula deseada a partir de un conjunto dado de moléculas iniciales. El sistema SYNCHEM-1 funciona con una búsqueda hacia atrás, intentando determinar las reacciones que pueden producir la molécula y los compuestos necesarios. El proceso continúa hasta que se encuentra un camino de síntesis desde la molécula destino hasta los componentes de partida.

El SYNCHEM-2 tiene la misma finalidad que su predecesor y utiliza la misma base de conocimientos. La diferencia entre estos dos sistemas radica en el método heurístico de búsqueda del camino de síntesis. En este caso aplica una búsqueda hacia adelante intentando construir la molécula final a partir de los compuestos de partida. Para ello utiliza un algoritmo heurístico que limita la búsqueda a aquellos caminos que satisfacen ciertas restricciones.

AYUDA EN LA PLANEACION DE EXPERIMENTOS

M O L G E N

Se desarrolló para la planificación de experimentos en genética molecular. Estos experimentos implican la unión de un gene en la bacteria, codificándolo para un producto proteínico deseado, de manera que la bacteria lo pueda fabricar. El sistema utiliza conocimientos sobre genética y sobre el objetivo del usuario para generar un plan, que después se materializa en un conjunto concreto de experimentos de la bacteria.

MOLGEN utiliza una representación y esquema de control orientados al objeto de tipo redes semanticas.

S P E X

Permite la planificación de experimentos complejos de laboratorio. El usuario describe los objetos que serán tratados; por ejemplo, el entorno físico del experimento y el sistema desarrolla un plan global para alcanzar la finalidad del experimento. A continuación, el sistema materializa cada paso del plan global en actuaciones concretas, basándose en técnicas almacenadas en la base de conocimientos.

CAPITULO IV

CONTROL DE PROCESOS QUIMICOS. CARACTERISTICAS Y PROBLEMAS ASOCIADOS

EL CONTROL DE PROCESOS QUIMICOS

Una planta quimica es un arreglo de unidades de proceso (reactores, cambiadores de calor, bombas, columnas de destilación, absorbedores, evaporadores, tanques, etc.) integrados entre si de manera sistemática y racional. El objetivo general de la planta es convertir ciertas materias primas en el producto o productos deseados utilizando los recursos energéticos disponibles de la manera más económica posible.

Durante esta operación una planta quimica debe satisfacer diferentes requerimientos impuestos por sus diseñadores y por las condiciones técnicas y económicas en presencia de cada cambio externo o perturbación. Algunos de los requerimientos son los siguientes (1) (2):

1. Seguridad. El nivel adecuado de seguridad del proceso quimico es un requerimiento primario para el bienestar de las personas en la planta y para su continua contribución al desarrollo

(1) Buckley, P. 1964. Techniques of Process Control. USA: John Wiley and Sons. pag. 219.

(2) Saigaa, Z. y Nieman, B. 1974. Computer Control of Ammonia Plants. USA: Chemical Engineering Progress. pag. 178.

económico. Por tanto, las condiciones de operación respecto a la presión, temperatura, concentración, etcétera, deben estar siempre dentro de límites seguros. Por ejemplo, si un reactor se ha diseñado para operar, con cierta tolerancia, a una presión determinada, se debe tener un sistema de control que mantenga la presión por debajo de dicho valor.

2. Especificaciones de producción. Una planta debe producir la cantidad deseada con la calidad requerida para el producto. Por ejemplo, se requiere de una producción de 50 toneladas de etileno por día, con una pureza del 99.5%, por lo tanto es necesario un sistema de control para asegurar el nivel de producción (50 toneladas por día) y las especificaciones de pureza (99.5%).
3. Regulaciones del medio ambiente. Existen varias leyes que especifican la temperatura, concentración de sustancias químicas y la rapidez de flujo para los efluentes de una planta dentro de ciertos límites. Por ejemplo, para limitar la cantidad de determinado gas que una planta puede expulsar a la atmósfera o para establecer la calidad del agua retornada a un río o lago.
4. Condiciones de operación. Los diferentes equipos utilizados en una planta química, tienen limitaciones inherentes que deben ser satisfechas durante la operación de la planta.

Por ejemplo, las bombas requieren cierta cabeza de succión positiva neta; los tanques no deben tener un sobreflujo o se derramarán; las columnas de destilación no deben inundarse; la temperatura en un reactor catalítico no debe exceder un límite superior ya que el catalizador se podría descomponer. El sistema de control es necesario para satisfacer todas estas condiciones de operación.

5. Aspecto económico. La operación de una planta debe coincidir con las condiciones del mercado, esto es, la disponibilidad de materias primas y la demanda del producto final. Mas aun, debe ser tan económica como sea posible en base al uso eficiente de las materias primas, energía, capital y fuerza laboral. Por lo tanto, se requiere que las condiciones de operación sean controladas a niveles óptimos determinados con un mínimo costo y máximo rendimiento.

Por los requerimientos mencionados se observa la necesidad de un monitoreo continuo en la operación de una planta química así como la intervención externa (control) para garantizar que los objetivos operacionales se satisfagan. Esto se lleva a cabo mediante una organización racional del equipo, instrumentos de medición, válvulas, controladores, computadoras, etcétera, y la intervención humana, diseñadores y operadores, que juntos constituyen el sistema de control.

Existen tres objetivos generales en un sistema de control (3):

- Contrarrestar las influencias de perturbaciones externas.
- Asegurar la estabilidad del proceso químico.
- Optimizar el funcionamiento del proceso.

Estas necesidades se examinan a continuación.

CONTRARRESTAR LAS INFLUENCIAS DE PERTURBACIONES EXTERNAS

Este es el objetivo más común de un controlador, tales disturbios denotan el efecto que los alrededores tienen en un reactor, separador, cambiador de calor, etcétera, y que están generalmente fuera del alcance del operador humano, por lo que se requiere introducir un mecanismo de control que haga los cambios necesarios en el proceso para cancelar el impacto negativo que tales disturbios puedan tener en la operación deseada.

SEGURIDAD EN LA ESTABILIDAD DE UN PROCESO

Considerando el comportamiento de la variable x mostrado en la figura 4.1 se observa que al tiempo $t = t_0$ el valor constante de x es perturbado por algún o algunos factores externos, pero a medida que aumenta el tiempo, el valor de la variable x regresa a su valor inicial y tiende a permanecer en ese valor. Si x es

(3) Douglas, E. y Neuman, B. 1974. op. cit. pag. 184.

una variable de proceso, como temperatura, presión, concentración o rapidez de flujo, decimos que el proceso es estable o autorregulado y no requiere de intervención externa para su estabilización. Se observa que no se necesita ningún mecanismo de control para que x regrese a su valor inicial (4).

En contraste al comportamiento, descrito anteriormente, la variable y , en la figura 4.2, no regresa a su valor inicial después de una perturbación externa. Los procesos en los que las variables siguen patrones similares al indicado por "y" en la figura 4.2 (curvas A B y C) se denominan procesos inestables, requieren de control externo para estabilizar su comportamiento. La explosión de una gasolina con aire es un caso de sistema inestable, el conducir una bicicleta es un intento de estabilizar un sistema inestable en el que esto se logra pedaleando e inclinando el cuerpo.

Para este tipo de casos se requiere un controlador que asegure la estabilidad de la operación en el estado estacionario intermedio.

(4) J. Kinsey, F. 1979. Process Control Systems. 4da. ed.
McGraw Hill. pag. 177.

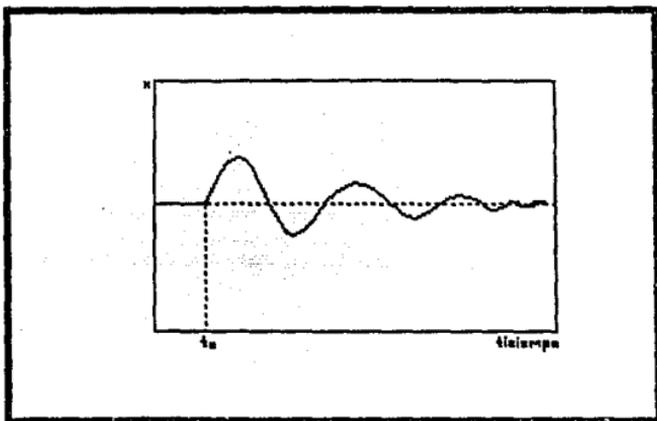


Figura 4.1 Respuesta de un sistema estable (5)

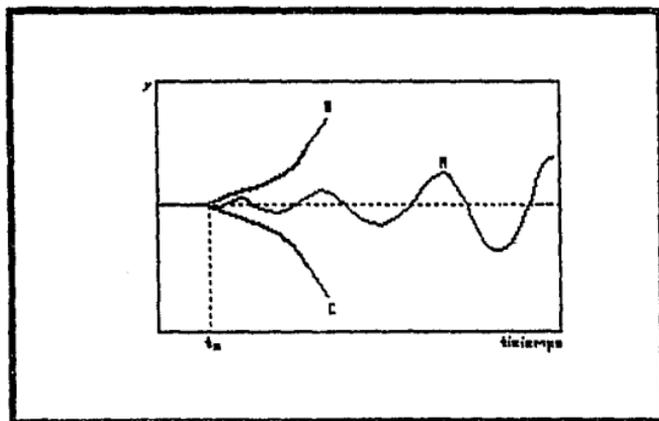


Figura 4.2 Alternativas de respuesta de un sistema inestable(6)

(5) *DAW, A. 1969. Elementary Chemical Reactor Analysis. Ed: Prentice Hall. pag. 89.*

(6) *SHAMSAH, Y. 1979. loc. cit.*

OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN PROCESO QUÍMICO.

La seguridad y la satisfacción de las especificaciones de producción son los dos principales objetivos operacionales en una planta. Una vez que estos son alcanzados, la próxima meta es cómo hacer la operación de la planta más rentable. Dado que las condiciones que afectan su operación no repercuten de la misma manera, desearíamos poder cambiar la operación (rapidez de flujo, presiones, concentraciones, temperaturas, etc.) de tal forma que los objetivos económicos siempre estén maximizados.

ASPECTOS DEL DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PROCESO

CLASIFICACIÓN DE LAS VARIABLES EN UN PROCESO QUÍMICO

Las variables, rapidez de flujo, temperaturas, presiones, concentraciones, etc. asociadas a un proceso químico se dividen en dos grupos (6):

1. Variables de entrada. Denotan el efecto de los alrededores sobre el proceso.
2. Variables de salida. Denotan el efecto del proceso sobre los alrededores.

(6) *data, R.* 1969. cap. cit. pag. 70.

Las variables de entrada también se pueden clasificar dentro de las siguientes categorías (7):

1. Variables manipuladas. Si sus valores pueden ser ajustados libremente por un operador humano o un mecanismo de control.
2. Perturbaciones. Si sus valores no son el resultado de un ajuste realizado por un operador o un sistema de control.

Las variables de salida también se clasifican de acuerdo a las categorías siguientes:

1. Variables de salida medidas. Es posible obtener sus valores por medición directa.
2. Variables de salida que no son medidas. Sus valores no se pueden obtener por medición directa.

La figura 4.3 sintetiza todas las clases de variables que se tienen alrededor de un proceso químico.

(7) Das, R. Soc. Ind.

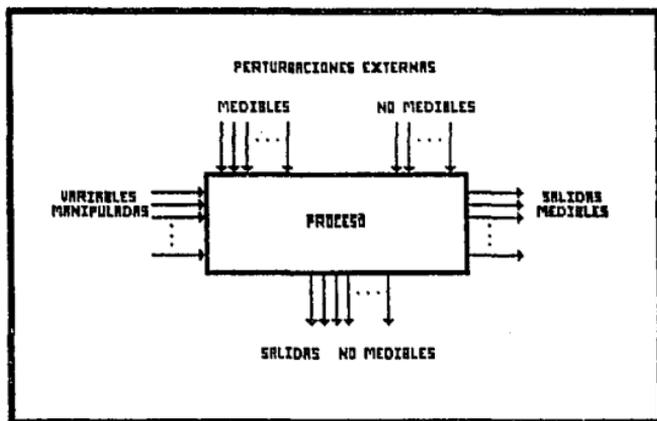


Figura 4.3 Variables de entrada y salida en un proceso (8)

ELEMENTOS DE DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL

Analicemos las preguntas básicas que se deben hacer y tratar de responder cuando se pretende diseñar un sistema que satisfaga las necesidades de control para un proceso químico.

Definición de los objetivos de control

El elemento central en cualquier configuración de control es el proceso que se quiere controlar. A partir de esto se plantean las siguientes preguntas:

(8) *data, R. loc. cit.*

Pregunta 1. ¿Cuales son los objetivos operacionales que debe cubrir el sistema de control?

La respuesta a esta pregunta determina los objetivos de control, con lo cual se permite:

- a) asegurar la estabilidad del proceso,
- b) suprimir la influencia de perturbaciones externas,
- c) optimizar el funcionamiento económico de la planta o una combinación de los anteriores.

Inicialmente los objetivos de control son definidos cualitativamente, posteriormente son cuantificados, generalmente en términos de las variables de salida.

SELECCION DE LAS MEDICIONES

Cualesquiera que sean los objetivos de control, se requiere de monitorear el funcionamiento del proceso químico, lo que se logra midiendo los valores de ciertas variables de proceso como temperaturas, presiones, concentraciones, rapidez de flujo, etc.

Pregunta 2. ¿Qué variables deben ser medidas para monitorear el funcionamiento del proceso?

Es evidente que se desearía monitorear directamente las variables que representan los objetivos de control y esto es lo que se hace siempre que es posible. A este tipo de mediciones se les llama mediciones primarias.

Algunas veces en los objetivos de control no hay cantidades medibles, lo que quiere decir que tenemos salidas del tipo no medibles. En tales casos se deben medir otras variables que puedan ser obtenidas fácil y certeramente, las cuales se denominan variables secundarias (9).

Por lo tanto se desarrolla una relación matemática por consideraciones teóricas, experimentales o relaciones empíricas entre las salidas no medibles y las variables secundarias:

$$(\text{salida no medible}) = f(\text{variables secundarias})$$

donde (salida no medible) representa al valor de la salida que no es posible medir directamente, y $f(\text{variables secundarias})$ es la función matemática por medio de la cual se obtiene el valor requerido, es decir los valores de las salidas no medibles (cuando los valores de las variables secundarias están disponibles).

La tercera clase de medición que podemos hacer para monitorear el comportamiento de un proceso químico incluye medidas directas de perturbaciones externas. La medición de las perturbaciones antes de que entren al proceso puede ser altamente ventajoso ya que permite conocer cuál será la tendencia del proceso químico y así tomar acciones de control para remediar consecuencias indeseables. Los controles con alimentación hacia adelante usan mediciones directas de las perturbaciones (figura 4.4).

(9) Lee, W. y Beakman, W. 1976. Advanced Control Practices in the Chemical Process Industry. USA: AIChE, pag. 29.

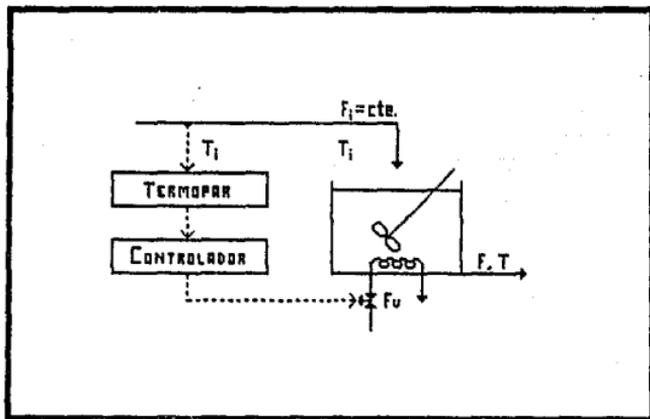


Figura 4.4 Control de temperatura con alimentacion hacia adelante para un tanque agitado con calentamiento (10)

SELECCION DE VARIABLES MANIPULADAS

Una vez que se han especificado las mediciones, la proxima pregunta se relaciona con el cómo efectuar un cambio en el proceso:

Pregunta 3: ¿Cuáles son las variables manipuladas que se usarán para controlar el proceso químico?

(10) Katsenbaum, G. y Khan, F. 1976. Design Concepts for Process Control. ISA: Industrial Engineering Chemical Process. pag. 28.

Generalmente, en un proceso se tiene un número disponible de variables de entrada las cuales se ajustarán libremente. Algunas de estas se seleccionarán como variables manipuladas, esta pregunta es crucial ya que la selección afectará la calidad de las acciones de control que se tomen.

SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DEL CONTROL

Después de que se tienen los objetivos de control, las posibles mediciones y las variables manipuladas han sido identificadas, se establece la configuración del control. Antes de definir una configuración de control, se pueden analizar algunas configuraciones; como por ejemplo, los dos sistemas de control por retroalimentación de la figura 4.5a y 4.5b, que constituyen dos diferentes configuraciones de control; la misma información (medida del nivel del líquido) fluye a diferentes variables manipuladas. De manera similar el sistema de control con retroalimentación (figura 4.6) y el sistema de alimentación hacia adelante (figura 4.4) para un tanque continuo con calentamiento constituyen dos configuraciones de control diferentes. Para estos sistemas de control se utiliza la misma variable manipulada, pero con diferentes mediciones. Así, para el sistema de retroalimentación (figura 4.6) se usa la temperatura del líquido en el tanque para todas las áreas del sistema (figura 4.4) midiendo la temperatura en la entrada.

En los ejemplos anteriores se notan dos configuraciones que difieren en lo siguiente:

1. El flujo de información (mediciones) está dirigido a la misma variable manipulada,
2. La variable manipulada tiene el mismo flujo de información.

Así, para los dos sistemas de control por retroalimentación de la figura 4.5a y 4.5b se usa la misma información, nivel del líquido, pero las variables manipuladas son diferentes, F o F1. En forma contraria, para el sistema de control mostrado en las figuras 4.4 y 4.6 se tienen diferentes mediciones (T o T1) las cuales se usan para ajustar el valor de la misma variable manipulada (Fv).

Una forma de definir a una configuración o estructura de control es como sigue: "es la estructura de la información que se utiliza para enlazar los valores disponibles a los valores manipulables" (11).

(11) FOUL, D. 1973. Cartas of Chemical Process Control
Theory. Wiley. Wiley. 211.

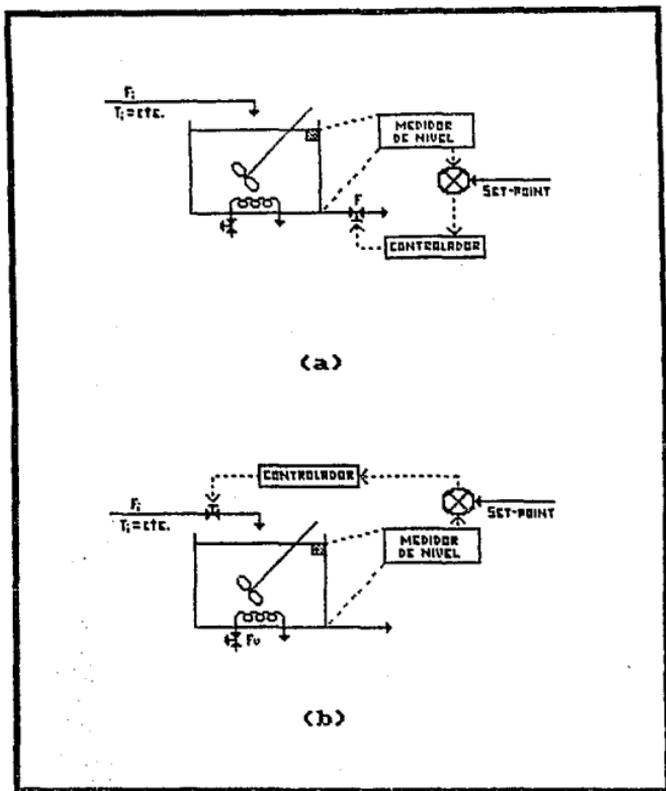


Figura 4.5 Esquema con dos alternativas para control de nivel de liquido (12).

- (12) Bunce, G. y Thomas, W. (editores). 1989. *Expert Systems Applications in Chemistry*. Ed: American Chemical Society. pag. 48.

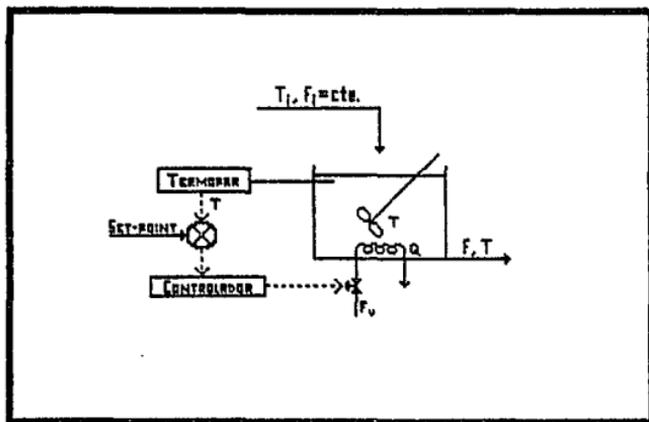


Figura 4.6 Esquema para un controlador de temperatura con alimentación hacia adelante para un tanque agitado con calentamiento (13).

Debido a que se pueden tener varias configuraciones para un mismo proceso, surge la siguiente pregunta:

Pregunta 4: ¿Cual es la mejor configuración de control que se ha dado, para determinada situación, en un proceso químico?

La respuesta es crítica por la calidad del sistema requerido para el diseño.

(13) Bauer, G. y Thomas, W. (editores) Loc. cit.

Dependiendo del número de salidas controladas y de entradas manipuladas en el proceso químico, se puede definir la configuración y por lo tanto, el sistema de control de entrada o salida individual (Single Input-Single Output SISO) o de múltiple entrada o salida (Multiple Input-Multiple Output MIMO) (14).

En la industria química la mayoría de los sistemas de proceso son de tipo múltiple entrada o salida (MIMO). Las configuraciones generales de interés son (15):

1. Configuración de control por retroalimentación. Se utilizan mediciones directas de las variables controladas para ajustar los valores de las variables manipuladas, figura 4.7. El objetivo es mantener las variables controladas a los niveles deseados (set point).
2. Configuración de control inferencial. Se usa en mediciones secundarias ya que las variables controladas no pueden ser medidas, para ajustar los valores de las variables manipuladas, figura 4.8. El objetivo es mantener las variables controladas, no medibles, en los niveles deseados.

(14) Considine, D. 1974. Process Instrumentation and Control
Wandbook. USA: McMillan. pgs. 214.

(15) Smith, C. 1972. Digital Computer Process Control.
USA: Intext Educational Publishers. pgs. 130.

El estimador utiliza los valores disponibles de las mediciones de salida, junto con los balances de materia y energía que rigen el proceso; para calcular matemáticamente los valores de las variables controladas no medibles. Esas estimaciones son usadas por el controlador para ajustar los valores de las variables manipuladas. Un ejemplo de inferencia en la configuración de este tipo de control se presenta en la figura 4.9c.

3. Configuración de control por alimentación hacia adelante. Requiere de mediciones directas de las perturbaciones para ajustar los valores de las variables manipuladas, figura 4.10. El objetivo es mantener los valores de las variables de salida en los niveles deseados. Un ejemplo de este tipo de configuración se muestra en la figura 4.4.

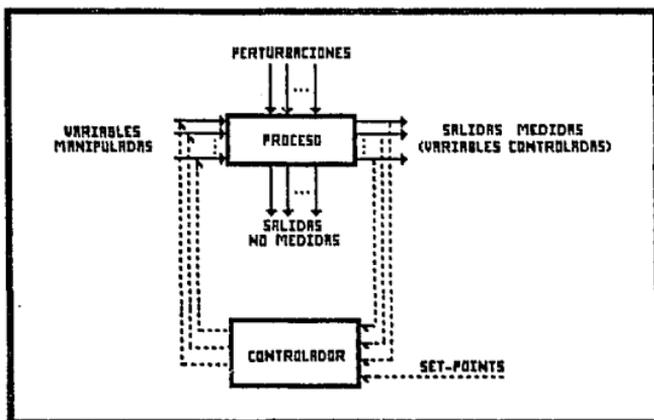


Figura 4.7 Control por retroalimentación (16)

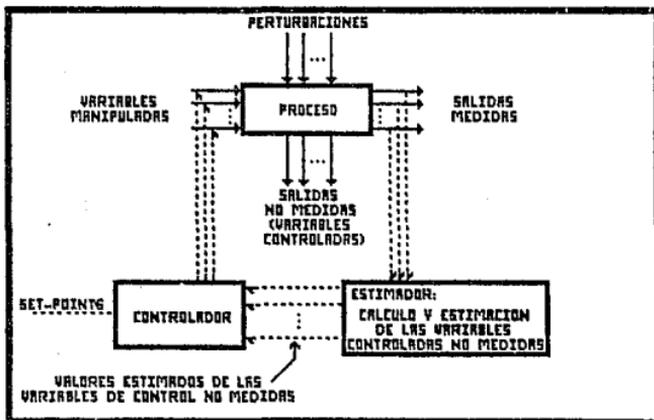


Figura 4.8 Control inferencial (17)

(16) Considine, D. 1974. op. cit. Ed: McGraw Hill. pag. 217.

(17) Considine, D. loc. cit.

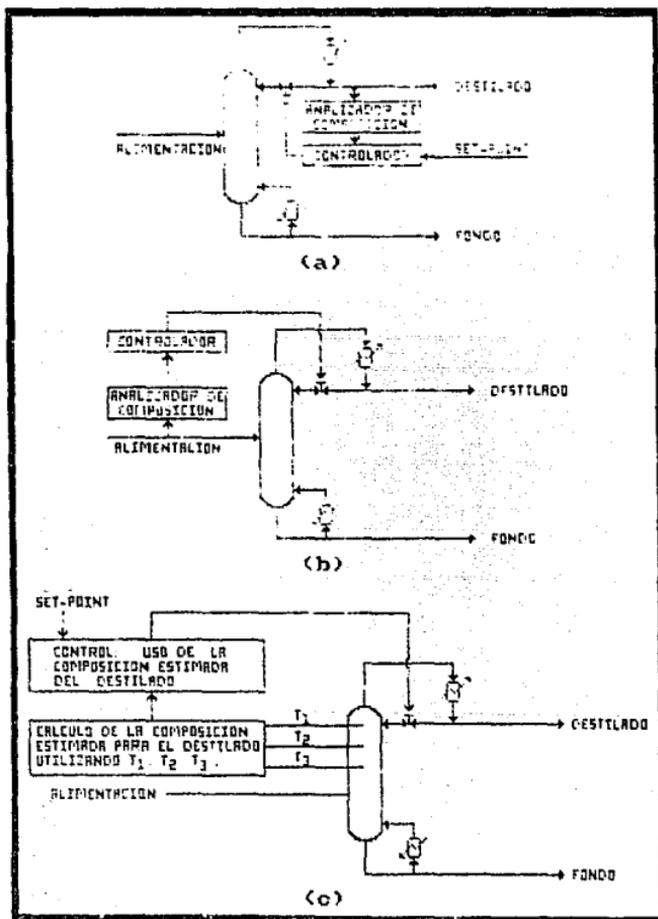


Figura 4.9 Tres diferentes sistemas de control en base a la composición del destilado en una columna simple: (a) alimentación hacia atrás; (b) alimentación hacia adelante; (c) alimentación inferencial (18).

(18). Considine, D. 1974. *op. cit.* Ed.: McGraw Hill. pag. 219.

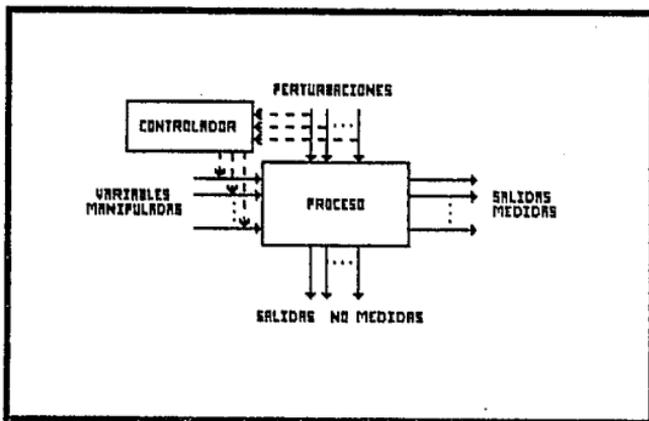


Figura 4.10 Estructura general de los sistemas de control con alimentación hacia adelante (19).

DISEÑO DEL CONTROLADOR

En cada configuración de control, el controlador es el elemento activo que recibe la información desde los instrumentos de medición y toma un control apropiado para ajustar los valores de las variables manipuladas (20). Para el diseño del controlador se debe responder a la pregunta siguiente:

(19) Considine, D. loc. cit.

(20) Ramco, G. y Thomas, W. (editores). 1989. op. cit. pág. 24.

Pregunta 5. ¿Cuál es la información tomada desde los instrumentos de medición que se usó para ajustar los valores de las variables manipuladas?

La respuesta a esta pregunta constituye la regla de control, que es implementada automáticamente por el controlador.

HARDWARE PARA SISTEMAS DE CONTROL DE PROCESO.

ELEMENTOS DEL HARDWARE DE UN SISTEMA DE CONTROL

En cada estructura de control se pueden distinguir los siguientes elementos del hardware (21):

1) El proceso químico. Representa el equipo material junto con las operaciones físicas o químicas que ocurren en él.

2) Los instrumentos de medición o sensores. Son usados para medir las perturbaciones, las variables de salida controladas o las variables de salida secundarias y son el principal recurso de información acerca de lo que está pasando en el proceso. Ejemplos característicos son:

- Termopares o termómetros de resistencia.
- Medidores de flujo.
- Manómetros.

(21) Latour, P. 1976. Energy Conservation via Computer Control. Vid: Chemical Engineering Progress. pag. 81

Un termómetro de mercurio no es un medidor adecuado para utilizarse en sistemas de control ya que dicha medición no puede transmitirse rápidamente. Por otra parte, un termopar es aceptable ya que este produce un voltaje que puede transmitirse rápidamente. Esa transmisión es un factor crítico en la selección de los instrumentos de medición.

Debido a que se requieren mediciones confiables para un control óptimo, los instrumentos de medición para el medio industrial deben ser precisos.

3) Transductores. Muchas de las mediciones no pueden utilizarse para el control hasta que se convierten en manifestaciones físicas, como son voltaje, corriente eléctrica o una señal neumática, que pueden ser transmitidas fácilmente. Así, tenemos el caso de los manómetros de tensión que son conductores metálicos cuya resistencia eléctrica varía cuando son sometidos a una variación de tensión mecánica por lo que pueden utilizarse para convertir una señal de presión en una eléctrica.

4) Líneas de transmisión. Transportan las señales desde el instrumento de medición hasta el controlador. Anteriormente, las líneas de transmisión eran neumáticas pero con el avance de los controladores electrónicos analógicos, y especialmente por la expansión en el uso de computadoras digitales para el control, las líneas transmiten señales eléctricas. Muchas veces la señal medida que proviene de un instrumento de medición es muy débil y

no puede ser transmitida a larga distancia. En tales casos las líneas de transmisión están equipadas con amplificadores que elevan el nivel de la señal. Por ejemplo, la salida de un termopar es del orden de unos pocos milivoltios, por lo que, antes de que sea transmitida al controlador, es amplificada al nivel de algunos voltios.

5) Controlador. Este es el elemento de hardware que tiene "inteligencia", recibe la información del instrumento de medición y decide qué acción debe tomarse. A esto se refiere el enfoque central de este trabajo ya que, anteriormente solo se podían ejecutar operaciones simples e implementar leyes de control sencillas, lo que se está superando actualmente mediante la tecnología de los sistemas expertos en particular y, en general, de la inteligencia artificial en los sistemas de control; la "inteligencia" de máquina disponible se ha expandido considerablemente por lo que se pueden implementar leyes de control muy complejas.

6) Elemento final de control. En este elemento es donde se originan las decisiones del controlador. Por ejemplo, si el controlador decide que la rapidez de flujo de la corriente de salida debe aumentar o disminuir, con el fin de mantener el nivel de líquido en un tanque con un valor determinado, se utiliza la válvula para llevar a efecto esta decisión de acuerdo a la magnitud de la señal correspondiente.

La válvula de control es el elemento más común pero no el único. Otros elementos finales de control para un proceso químico son:

- Interruptores de control encendido-apagado.
- Bombas de velocidad variable.
- Compresores de velocidad variable.

7) Elementos de almacenamiento de datos. Muestran en forma cuantitativa el funcionamiento de los procesos químicos. En general las variables almacenadas son las variables medidas directamente en el sistema de control. Se pueden observar varios tipos de datos almacenados, como son: temperaturas, presiones, rapidez de flujo, composiciones, etcetera. Estos se almacenan en el cuarto de control en la planta química y se obtienen por monitoreo continuo del comportamiento del proceso. A partir de la introducción de las computadoras digitales en los procesos de control, se ha aumentado la capacidad de almacenamiento de datos.

En la figura 4.11 se presentan los elementos del hardware utilizados para el control de un tanque agitado con calentador.

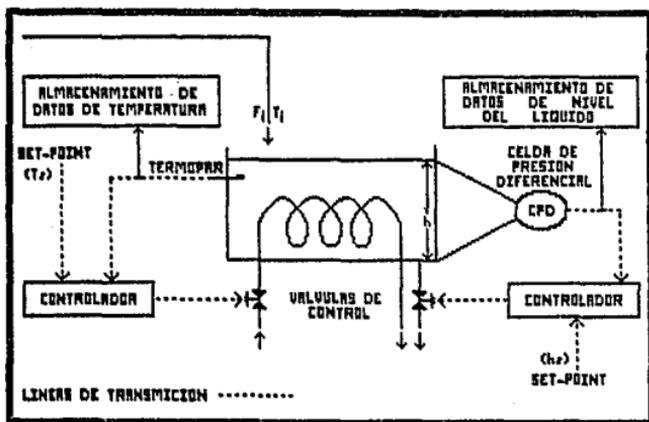


Figura 4.11 Elementos del "hardware" para un control por retroalimentación en un tanque agitado con calentador (22).

USO DE COMPUTADORAS DIGITALES EN PROCESOS DE CONTROL

El rápido desarrollo de la tecnología de las computadoras digitales durante los últimos años, aunado a la disminución de su costo, ha tenido un profundo efecto en la forma en que se controlan las plantas químicas. Las expectativas de mejoramiento

(22) Castellano, E. y McCain, C. 1978. Digital Control of a Distillation System. Ed: Chemical Engineering Progress, pág. 58.

junto con el aumento de técnicas complejas en el diseño de control, hace que las computadoras digitales sean el centro del desarrollo de sistemas de control para procesos químicos.

Actualmente grandes plantas químicas como son las refinerías, plantas de etileno, de amoníaco y muchas otras más cuentan con un control en base a computadoras digitales. Los resultados muestran un mejor control y la reducción de los costos de operación (24).

En el pasado las reglas de control que se implementaban eran simples, tales como sistemas de control proporcional o proporcional-integral. Las computadoras digitales usadas en los procesos de control han revolucionado considerablemente la capacidad de "inteligencia", lo que implica que las reglas de control puedan ser más complejas. Además, la computadora digital con su inherente facilidad de programación puede "aprender" en la medida que recibe los valores medidos en el proceso, y por tanto puede modificar las reglas de control durante la operación de la planta.

Las computadoras digitales han permitido una gran diversidad de aplicaciones en el control de procesos industriales, como por ejemplo (25):

(24) Musmefeld, A. 1973. Applying Control Computers to an Integrated Plant. Vtd: Chemical Engineering Progress. pág. 47.

(25) Latona, P. loc. cit.

1. Control digital directo (direct digital control - DDC). La computadora recibe directamente las mediciones del proceso y en base a una regla de control, la cual está programada y almacenada en la memoria de la misma, calcula los valores requeridos a partir de la variable manipulada. Lo que permite tomar una decisión implementada directamente en el proceso para el ajuste apropiado mediante los elementos finales de control (válvulas, bombas, compresores, interruptores, etc.) La figura 4.12 ilustra una configuración típica DDC, el proceso puede ser: calentadores, reactores o separadores. Las dos interfaces, antes y después de

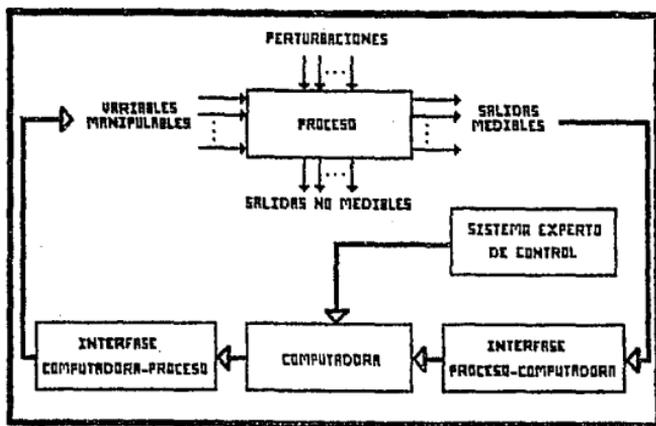


Figura 4.12 Configuración del Control Digital Directo (26)

(26) Zafra, P. loc. cit.

la computadora, son elementos del hardware utilizados para proporcionar compatibilidad en la comunicación entre esta y el proceso. Finalmente el operador humano puede interactuar con la computadora y modificar la operación de la configuración del control digital directo.

Actualmente la industria química tiende hacia la implementación de sistemas de control digital directo. Un sistema típico de estos para una planta de etileno puede incluir entre 300 y 400 loops de control. Los fabricantes de sistemas de control para la industria química se apoyan cada vez más en sistemas de control digital directo.

2. Análisis de operación computarizado. En muchas ocasiones los operadores humanos no pueden encontrar la mejor alternativa operacional. Esta deficiencia se debe a la complejidad en la descripción de la mayoría de los procesos químicos, en tales casos es conveniente la rapidez e inteligencia de las computadoras digitales para analizar la situación y sugerir la mejor alternativa.

3. Planificación controlada por computadora. La computadora puede ser utilizada para planificar la operación del proceso en particular y de la planta en general en base a las condiciones cambiantes del mercado, oferta, demanda, precios, etc.

Estas decisiones pueden tomarse racionalmente con la ayuda de la computadora digital la cual puede comunicarlas a los controladores.

NOMENCLATURA PARA EL CAPITULO V

$Av(K)$ = avance de la reacción hasta el momento en que se tomó la muestra K , $0 \leq Av(K) \leq 1$

V = velocidad de agitación

VB = velocidad de agitación baja

VM = velocidad de agitación media

VA = velocidad de agitación alta

m = viscosidad

md = viscosidad deseada

Ni = nivel del líquido en el tanque i

NR = nivel del líquido en el reactor

Vi = válvula i

Ue = apertura de la válvula de enfriamiento, $0 \leq Ue \leq 1$

Uc = apertura de la válvula de calentamiento, $0 \leq Uc \leq 1$

Fi = factor de corrección para el proceso de aprendizaje

P = presión

Pi = valor de la presión i

dT / dt = variación de la temperatura respecto al tiempo

T = temperatura

$T*$ = temperatura deseada (set-point)

T' = temperatura de referencia obtenida a partir de los lotes anteriores (para la zona A)

t = tiempo

te = tiempo requerido para lograr el objetivo del avance
(AV >= 0.95)

tf = tiempo final, tiempo en que se establece que m = md

x = tiempo requerido para llegar a T_r

z = tiempo en el que la temperatura está fuera de control con el controlador automatico

λ = tiempo de inicio de la reacción (aparición de la primera burbuja)

tv = tiempo en el que el reactor se ha vaciado

I = indicador interno para una parte de las reglas de control

C-i = regla de control i para el sistema de control (tabla I)

S-i = regla de control i para el sistema de enfriamiento (tabla II)

M(i) = muestra i

RA = valor representativo del diagnóstico de condición para la zona A

RB = valor representativo del diagnóstico de condición para la zona B

RC = valor representativo del diagnóstico de condición para la zona C

x_i = tiempo en que finalizó la zona A en el íesimo lote anterior

n_i = tiempo de duración de la zona A, B, o, C dividido entre el rango considerado para la misma

A_i = suma de los diagnósticos de condición para el íesimo lote anterior de la Zona A

B_i = suma de los diagnósticos de condición para el i ésimo lote anterior de la zona B

C_i = suma de los diagnósticos de condición para el i ésimo lote anterior de la zona C

R_i = suma de los diagnósticos de condición para el i ésimo lote anterior de una zona determinada, dividida entre n_i

RA = promedio de los tres R_i anteriores para la zona A

RB = promedio de los tres R_i anteriores para la zona B

RC = promedio de los tres R_i anteriores para la Zona C

CAPITULO V

PLANTEAMIENTO DE SISTEMA EXPERTO PARA AUTOMATIZAR UN REACTOR INTERMITENTE EXOTERMICO

En este trabajo se propone un sistema de automatización, diseñado para supervisar y controlar un reactor intermitente. El sistema tiene una parte de aprendizaje que simula el razonamiento de un operador, gradualmente se extraen características esenciales del proceso, las cuales son también usadas para revalorizar el control mientras se satisfaga una trayectoria "óptima" y segura.

El proceso por lotes es una antigua actividad tecnológica. Las características de un proceso intermitente o por lotes, tales como la planeación, preparación de objetivos, puesta en marcha, trayectoria y terminación, se presentan conforme a la estructura natural del entendimiento humano. Esto ha cambiado relativamente poco desde los inicios de la industria química, hasta los modernos procesos intermitentes. El proceso intermitente se caracteriza por la variación de la composición en función del tiempo, ésta comprende aspectos que pueden ser manipulados por un operador que participa así en el proceso de decisión para el control y también para el mejoramiento de un lote del reactor al siguiente por aprendizaje.

El advenimiento de los modernos procesos continuos gradualmente desgastó el estatus tradicional de los procesos intermitentes, que fueron reemplazados siempre que fue posible por sus equivalentes sistemas continuos, con lo que se minimiza el gasto de dos recursos, mano de obra y tiempo. Esta evolución ha tenido que enfrentar su eventual límite debido a consideraciones económicas o de funcionamiento; algunos procesos son muy complejos o poco entendidos como para permitir la automatización para la generación continua de productos con estrictos estándares de calidad, tal es el caso de muchas reacciones de polimerización. Esto no quiere decir que la automatización no sea aplicable a los procesos intermitentes, sino que el control de estos procesos requiere de líneas que son diferentes a las de los procesos continuos, donde la planeación, interconexión y manejo a lo largo de una trayectoria en el tiempo están fijados (1).

La suficiente diversificación de las computadoras digitales, que aparecieron en la segunda mitad de este siglo y fueron originalmente ideadas en base a la secuencia lógica, también desarrolladas como una herramienta de cálculo y después aplicadas al control de procesos continuos, en forma de controladores como se vio en el capítulo anterior, contribuyeron sustancialmente a la automatización del proceso intermitente.

(1) Zaka, R. 1977. Practical Simulation and Scale-up Methods for Assessing the Cooling of Endothermic Batch Reactions. Ed: Chemistry and Industry. ppg. 253.

Se requiere de operaciones simples o posiblemente combinaciones complejas de las mismas, tales como la realizada por una bomba o una válvula. La automatización de las decisiones más complicadas tuvo que esperar hasta el desarrollo de las herramientas de inteligencia artificial, las cuales están ahora aproximándose a una forma madura y se incrementa su uso en forma de sistemas expertos (2)(3).

En este trabajo se analiza un reactor intermitente típico y los problemas esenciales asociados con su control para el caso de una polimerización en solución. La reactividad térmica y su considerable efecto en la rapidez de reacción, representa un problema de control muy importante, ya que el control de la temperatura en el caso de un reactor intermitente, implica que se tenga la capacidad de proporcionar o extraer calor para lograr un gradiente grande de temperatura.

Los sistemas convencionales de alimentación generalmente no son adecuados para el manejo de grandes rangos de temperatura, por lo que la capacidad de enfriamiento-calentamiento es limitada. Es posible el control manual de las condiciones de operación, por lo que puede ser dirigido por un sistema experto de control(4).

(2) Gainwell, J. y Estel, B. 1987. Expert systems and Chemical Engineering. USA: Chemical Engineering. pbg. 41.

(3) Bonvin, D. y Janes, V. 1988. On Line Procedures for Supervising the Operation of Batch Reactors. USA: Computers and Chemical Engineering. pbg. 373.

(4) Nugo, P. et. al. 1988. Calculation of the Maximum Temperature in Stirred Tank Reactors in Case of a Breakdown of Cooling. USA: Chemical Engineering Science. pbg. 46.

El análisis del método de control conduce a la definición del estado del proceso en un esquema generalizado de información alimentada hacia atrás, que cuente con acciones inmediatas de control dentro del tiempo requerido conforme a un reactor en particular así como con un sistema de aprendizaje en base a la experiencia de un lote al siguiente, de tal forma que se mejore el funcionamiento con el tiempo (5).

REVISIÓN DE ALTERNATIVAS

El problema fundamental del control de un reactor intermitente exotérmico consiste en proporcionar o extraer calor al sistema. Por otra parte, como en todos los problemas de control, mientras mayor sea la información que se tenga, se pueden esperar mejores resultados. Por lo tanto, como en todos los procesos intermitentes, los parámetros de operación pueden corresponder a una función del tiempo, pero debido a la naturaleza transitoria de la trayectoria del reactor, no siempre se puede tener el conocimiento exacto de los procesos. La no linealidad dinámica, debida a la rapidez de reacción constituye un aspecto adicional.

(5) Uygan, R. 1988. Chemical Reaction Engineering for Safety.
Ed: Chemical Engineering Science. pg. 176.

Esto explica por que el control de un reactor intermitente se ha estudiado como un potencial beneficiario de la estrategia de las alternativas de control mas que como un sistema convencional de control por alimentación hacia atrás (6).

Juba y Hamer (1986) (7) presentaron una revision del estado actual de los procesos de control para reactores intermitentes. Las aplicaciones determinísticas han abarcado un amplio espectro, desde combinaciones de parametros en esquemas con alimentación hacia adelante y hacia atrás, hasta la aplicación de controladores adaptativos.

Astrom (1983) (8) critico el uso injustificado de controles adaptativos en aplicaciones donde bien podrian utilizarse PID (control Proporcional Integral Derivativo) de alimentación hacia atrás.

Morari y Zafiriou (1989) (9) proponen los procesos robustos de control como una alternativa viable, aun para procesos de circuito abierto (open-loop) inestables en los cuales hay una significativa incertidumbre paramétrica.

-
- (6) Zeman, B. y Zarda, A. 1989. Designing and Implementing Feedback for an Episodic Batch Chemical Reactor. Ud: Industry and Engineering Chemical. pag. 269.
- (7) Juba, M. y Hamer, J. 1986. Problems and Challenges in Batch Process Control. Ud: Chemical Process Control. pag. 140.
- (8) Astrom, K. 1983. Theory and applications of adaptive control. Ud: Chemical Process Control. pag. 473.
- (9) Morari, M. y Zafiriou, E. 1989. Robust Process Control. Ud: Pentice Hall. pag. 53.

Jutan y Uppal (1984) (10) reportan la teoría exitosa de un probador para controlar donde la acción de la alimentación hacia adelante compensa la liberación de calor. La mayoría de las publicaciones recientes sobre controladores en reactores intermitentes cuentan con esquemas adaptativos.

Estudios teóricos sobre la aplicación de controladores adaptativos a reactores intermitentes han sido realizados por Shah y colaboradores (1983) (11) y por Takamatsu (1985) (12).

Posteriormente los métodos de diseño se han basado en un controlador proporcional integral derivativo (PID) autoajustado en modelos de control interno. Existen también reportes de aplicaciones industriales de estos métodos, Akesson (1985) (13) reporta el uso de un regulador adaptativo comercial, el ASEA NOVATUNE para un reactor intermitente en operación, mientras que Niederlinski (1985) (14) describe el uso de métodos adaptativos para un convertidor intermitente de PVC.

-
- (10) Jutan, G y Uppal, G. 1984. Combined Feedforward-feedback Same Control Scheme for an Endothermic Batch Reactor. Ind. Eng. Chem. Res. 23: 598.
- (11) Kapanisides, C. y Shah, S. 1983. Self-tuning and stable adaptive control of a Batch Polymerization Reactor. Chem. Process Control. 3: 227.
- (12) Umlauf, W. 1985. Adaptive Control of Chemical Processes. ISA Trans. 34: 104.
- (13) Umlauf, W. 1985. op. cit. ibid. 34: 117.
- (14) Phillips, J. et al. 1988. Adaptive Control Strategies for Achieving Desired Temperature During Process Start-up. Ind. Eng. Chem. Res. 27: 1438.

La implementación de un esquema adaptativo permite asegurar el comportamiento deseado en condiciones normales de operación sin la necesidad de reajustar el algoritmo de alimentación hacia atrás. En cualquier caso, la puesta en marcha debe ser adecuada por algún método alternativo, ya que en un esquema convencional estará solo encaminado a la decisión de un punto fijo. En el caso de estudio, la trayectoria a lo largo de la puesta en marcha depende de la reacción cinética no lineal en la que se asume que los parámetros son desconocidos. Esta incertidumbre sugiere el uso de una aproximación heurística para controlar la rutina de la puesta en marcha.

Aplicaciones de la tecnología de sistemas expertos a procesos de control en general se presentan en los trabajos de Bailey (1986) (15), Niida (1986) (16) y Kane (1987)(17) y en particular a control de reactores intermitentes en los trabajos de Nisenfeld (1986), Turk (1986) y Blickley (1987) (18), Cram y Clarke (1988) (19).

-
- (15) Bailey, J. 1986. Artificial Intelligence in Industry. IISA: Control Engineering. pbg. 47.
- (16) Umeda, T. y Niida, K. 1986. Process Control System Synthesis In an expert system. IISA: Control Theory and Advanced Technology. pbg. 386.
- (17) Kane, Z. 1986. Artificial Intelligence in Processing Industries. IISA: Hydrocarbon Processing. pbg. 58.
- (18) Nisenfeld, E. y Turk, M. 1986. Batch reactor control: Could an expert system help? IISA: Inlect. pbg. 82.
- (19) Cram, A. y Clark, B. 1988. Expert System Monitoring and Control of a Polymer Plant. London: IEE. pbg. 62.

Por definición, los sistemas expertos son elaborados para dar solución a problemas complejos en los que los métodos convencionales de control no son suficientes por si mismos debido a la complejidad, y para los cuales algunos expertos son capaces de dar solución. El control de un reactor intermitente representa un caso particular de ese tipo de problemas. En la literatura se describen varias aproximaciones de solución para este problema, de acuerdo con King y Mandani (1977) (20), Tong (1977) (21), Zadeh (1984) (22), se incluye en un extremo la aplicación de lógica compleja, donde la incertidumbre se expresa en un cuadro estadístico y por el otro extremo Sripada (1986)(23) ha aplicado el razonamiento analítico en "Controles Optimos Robustos" (Robust Optimal Control), en base a procesos en los que se utiliza el control de tiempo óptimo, para lo cual se necesita un modelo considerablemente exacto.

-
- (20) King, P. y Mandani, S. 1977. The application of a fuzzy control system to industrial process. Udd: Chemical Process Control. pag. 238.
- (21) Tong, R. 1977. A control engineering review of fuzzy systems. Udd: Chemical Process Control. pag. 561.
- (22) Zadeh, L. 1984. Making Computers Think Like People. London: IEE. pag. 27.
- (23) Sripada, N. et. al. 1986. An Artificial Intelligence Application for process regulation and servo control. Udd: Reporte Técnico de la Universidad de Alberta. pag.23.

La proposición presentada en este trabajo trata de conducir una trayectoria en la que por las características generales del proceso se obtenga una definición clara de su estado sin requerir de un modelo matemático detallado, sino que mediante reglas de tipo heurístico, el sistema experto establezca el diagnóstico del estado actual del proceso y decida qué acción de control es la más apropiada. El sistema también se debe modificar (aprender) gradualmente a partir de las experiencias previas para delinear la trayectoria futura más apropiada.

GENERALIZACIÓN DEL CONTROL PARA EL REACTOR INTERMITENTE

Esta generalización en una categoría particular no es fácil ya que el elemento fundamental, la reacción química, puede diferir considerablemente de un caso a otro, con implicaciones en los objetivos y criterios de funcionamiento. De este modo, la producción de polímeros u otros materiales que involucran procesos muy exotérmicos y algunas veces reacciones autocatalíticas, representa problemas que son diferentes a los relacionados con reacciones que tienen alta selectividad o pureza de productos. No obstante, se intenta la formulación de un modelo conceptual que incluya elementos suficientes. Para esto es necesario separar los procesos por su complejidad, formulación, carga de reactivos y descarga de productos.

Estos pasos son características específicas de los procesos e independientes del aspecto central que se refiere a la reacción química por sí misma.

La opción de un sistema experto para este problema implica que existen algunos aspectos que no son completamente conocidos o entendidos, o bien que no son fácilmente formulables matemáticamente. Esto no quiere decir que todas las partes del problema pertenezcan necesariamente a esta categoría. De hecho una expectativa de representación balanceada, es utilizar un modelo matemático en esas partes del problema donde es posible, y dejar que el sistema experto haga lo que puede hacer mejor. Los límites entre las partes del problema son frecuentemente arbitrarios, y están determinados por el juicio del modelador, lo que es particularmente evidente en la formulación de las aseveraciones.

Los modelos en general se basan en los supuestos siguientes:

- (a) El contenido del reactor está bien mezclado todo el tiempo. Eso no siempre se cumple, en particular en grandes reactores y en casos donde la masa de reacción es muy viscosa.
- (b) El sistema de calentamiento-enfriamiento (enchaquetado) es uniforme.
- (c) La operación en todo el recipiente sigue una trayectoria respecto a las cantidades y tiempo de adición de los reactivos, solventes, catalizadores, moderadores, etc.

Lo que se puede definir como una secuencia pre-programada, o como una acción de control en respuesta a las condiciones desarrolladas a lo largo de la trayectoria de reacción (retroalimentación).

Las principales etapas en la formulación de una trayectoria de reacción se muestran en la figura 5.1 y son:

- (A) Inicio de la reacción. Comprende la transición desde el inicio (frío) hasta el nivel de "óptimas" condiciones de reacción.

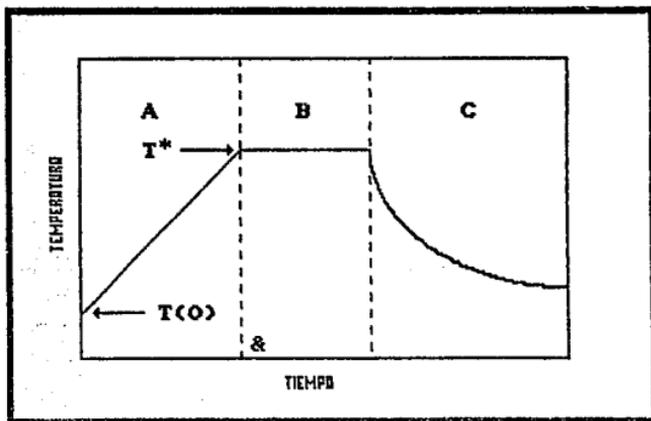


Figura 5.1 Trayectoria de temperatura en un reactor intermitente: A - arranque, B - condiciones nominales de operación, y C - terminación (24).

(24) Morlokwin, B. y Zuyben, P. 1973. Practical Control Studies of Batch Reactors Using Realistic Mathematical Models. Udd: Chemical Engineering Science. #59. 165.

- (B) Operación "óptima". Se conduce la reacción con un sustancial avance en condiciones "óptimas".
- (C) Fin de reacción. Comprende la transición desde las condiciones "óptimas" hasta condiciones seguras de descarga.

La trayectoria de temperatura define 3 zonas a lo largo de la duración del proceso de un lote. La zona de inicio ("start-up") es generalmente la más crítica debido a la influencia que tiene la trayectoria seguida conforme al funcionamiento del reactor, así como a la dificultad para controlar dicha trayectoria.

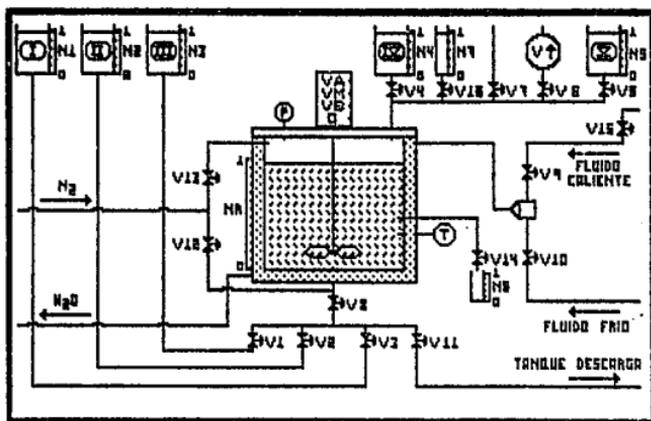


Figura 5.2 Representación del reactor y sistema periférico

Esta transición generalmente comprende un rango relativamente amplio de temperatura y presión lo que hace muy difícil el control de manera convencional con parámetros establecidos, o mediante control por retroalimentación, excepto con la participación directa de un operador, cuyos actos se resumen en el siguiente grupo de indicaciones para el caso de la operación del reactor mencionado (figura 5.2), en el que se lleva a cabo una polimerización en solución por radicales libres.

CARGAS:

- I. Disolvente
- II. Monómero A
- III. Monómero B
- IV. Diluyente

1. Aplicando vacío llegar hasta $P = P_1$.
2. Introducir la CARGA I mediante vacío.
3. Reestablecer el vacío hasta $P = P_1$.
4. Introducir la CARGA II mediante vacío.
5. Reestablecer el vacío hasta $P = P_1$.
6. Introducir la CARGA III mediante vacío.
7. Reestablecer el vacío hasta $P = P_1$.
8. Introducir nitrógeno hasta tener presión atmosférica ($P = 0$ en el manómetro).
9. Iniciar la agitación a velocidad baja.
10. Agregar la CARGA IV e iniciar a tomar el tiempo.
11. Introducir nitrógeno hasta $P = P_2$.

12. Sacar nitrógeno (+ aire + volátiles) por venteo hasta $P = P_3$.
13. Repetir 11 y 12 (tres veces).
14. Repetir 11.
15. Fijar el controlador de temperatura a $T = T^*$ (set-point).
16. Permanecer en T^* hasta que inicie la reacción (aparición de espuma) ($t = \&$).
17. Si después de 2 hrs. de permanecer en T^* no inicia la reacción, realizar los siguientes pasos:

17.1 Sacar nitrógeno por venteo hasta llegar a $P = P_3$ y alimentar nitrógeno ahora burbujeandolo por abajo hasta llegar a $P = P_2$. En caso necesario repetir esto tres veces, si esto no da resultado entonces:

17.2 Elevar gradualmente T^* en 20°C , seguido del paso anterior.

18. Una vez iniciada la reacción ($t = \&$) mantener la temperatura entre $(T^* - 2)$ y T^*
19. La primera muestra se toma cuando $t = (\& + 180)$ min. y las siguientes cada 120 min.
 - * Se analiza conversión (o avance) y peso molecular (determinación de sólidos totales por evaporación).
20. En caso de que la temperatura no se pueda controlar con el controlador automático; esto es, que se eleve, realizar los siguientes pasos (en orden, conforme a los resultados):

- 20.1 Bajar el selector de temperatura totalmente.
 - 20.2 Cerrar la válvula (manual) de vapor.
 - 20.3 Aumentar gradualmente la velocidad de agitación.
 - 20.4 Si lo anterior no es suficiente, agregar disolvente (por la parte superior) en cantidades bajas (aproximadamente 1% del volumen de la CARGA I).
21. Una vez que la temperatura empieza a descender, operar en sentido inverso desde 20.3 hasta 20.1 (gradualmente), esto es:
- 21.1 Disminuir gradualmente la velocidad de agitación.
 - 21.2 Abrir la válvula (manual) de vapor.
 - 21.3 Subir el selector de temperatura hasta $(T = 2)$ °C
22. Una vez alcanzada la conversión de al menos 95%, enfriar el lote hasta $T = 30$ °C
23. Ventear y parar el sistema de enfriamiento.
 24. Aumentar agitación al punto medio.
 25. Agregar la CARGA V hasta obtener la viscosidad requerida.
 26. Suspender la agitación.
 27. Descargar el lote.

PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA EXPERTO PARA EL CONTROL DE UN REACTOR INTERMITENTE EXOTERMICO

Un sistema experto para el control de un reactor intermitente debe incluir:

- a) Activación lógica y automatizada de todas las acciones programables fijadas, tales como la activación de válvulas, bombas, motores, alarmas, etc.
- b) El control del proceso por lapsos de tiempo donde las condiciones de operación se mantienen dentro de un rango relativamente estrecho.
- c) La conducción "inteligente" del proceso a lo largo de una trayectoria que proporcione el funcionamiento deseado mediante imitación de la operación manual realizada por un operador habil. Esto requiere de un esquema táctico básico que conduzca las acciones dentro de la escala de tiempo de un solo lote además de un mecanismo estratégico de "aprendizaje" diseñado para mejorar el control de un lote a otro.

En la operación manual, el operador participa en acciones de calentamiento o enfriamiento a continuación de las instrucciones de operación preestablecidas, modificadas posteriormente en la práctica con base en el razonamiento cualitativo y cuantitativo usando la intuición y experiencia. Conceptos referentes al estado del proceso, los cuales podrían calificarse adecuadamente si se dispusiera de un modelo completo así como de las mediciones

exactas de todos los parámetros en cada instante, son detectados y juzgados por el operador principalmente mediante algunas manifestaciones y mediciones indirectas. El sistema experto de control automático debe imitar este procedimiento de control manual así como también mejorarlo donde sea posible.

La estrategia de control usada se basa en un conjunto de reglas heurísticas, corregidas a través del tiempo a lo largo del aprendizaje. El objetivo basado en reglas es forzar una trayectoria para obtener rápidamente un punto establecido de temperatura "óptima" deseada mientras se evitan con seguridad las condiciones fuera de control y desviaciones excesivas. Estos objetivos se describen en términos comunes al capturar las características esenciales de la trayectoria deseada como eventos y condiciones.

Algunos eventos pueden ser cuantificados mientras que otros pueden ser definidos vaga y cualitativamente. Por ejemplo, una elevación súbita de temperatura puede expresarse como una variación de temperatura respecto al tiempo la cual tenga un valor positivo y haya alcanzado un límite determinado de temperatura máxima.

Algunas características de trayectoria pueden ser cuantificadas aproximadamente dentro de enlaces. Tómese como ejemplo la trayectoria de acercamiento desde el inicio hasta el nivel de operación deseado.

Al considerar la temperatura como la variable más crítica que se debe observar y controlar, se puede usar una "familia" de trayectorias factibles potencialmente en el plano de temperatura-tiempo para definir una trayectoria característica deseada en términos de una "zona" (figura 5.3). La definición de esta zona se basa por lo menos en un entendimiento cualitativo.

Primero, se aplica calor para elevar la temperatura de la mezcla reaccionante a una temperatura aproximada a T_s (temperatura de operación deseada) y una aplicación inequívoca de la capacidad total de calentamiento en esta etapa puede tomarse para indicar que la sección inicial de la trayectoria siempre será hasta este punto la "misma". De aquí en adelante, la trayectoria seguida dependerá de las acciones de control que sean tomadas.

En los trabajos de Lewin y Lavie (1969)(25) está demostrado que las restricciones por un lado, y las consideraciones de estabilidad por el otro, pueden delinear satisfactoriamente la trayectoria de temperatura durante la etapa inicial. Esto define una zona dentro de la cual existe una trayectoria deseada para la etapa inicial.

(25) Lewin, S. y Lavie, R. loc. cit.

Habiendo caracterizado la zona inicial de temperatura, debe usarse como tal en la formulacion de las reglas de control por medio de una estructura lógica o alternativamente se puede asignar en forma arbitraria una trayectoria central definida para ser usada en las reglas. Por ejemplo, las reglas se pueden basar en la trayectoria central ABC de la figura 5.3, considerando el argumento de que ésta es la mejor aproximación tangencial a la trayectoria de temperatura deseada (26).

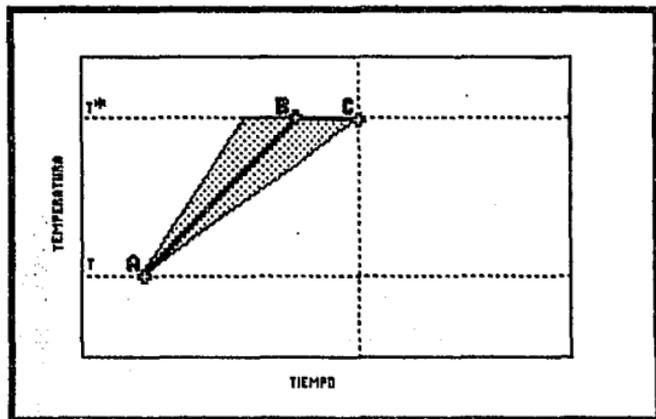


Figura 5.3 Trayectoria de arranque (26)

(26) Zuydam, B. 1973. Process Modeling Simulation and Control for Chemical Engineers. Ed: McGraw Hill. pág. 93.

DESCRIPCIÓN GLOBAL DEL SISTEMA EXPERTO

Los resultados del proceso tomados con intervalos de tiempo adecuados, por ejemplo, presión, temperatura y concentración se usan para clasificar el estado real del reactor con base en el razonamiento, establecido de acuerdo con el conocimiento del proceso. En cada intervalo correspondiente al muestreo se diagnostica el estado del proceso como una condición al comparar un grupo de criterios para la salida o resultados de acuerdo a la función representada en este caso por $Y(k)$:

$$Y(k) = [Av(k), T(k), dT/dt(k), t(k)]$$

para cada muestra k .

Esta información se usa para conducir dos procesos diferentes:

1. Directamente en el proceso de control para generar la respuesta al estado actual de operación. La estructura del proceso de control se muestra en la figura 5.4
2. El diagnóstico de condición se usa también para alimentar un proceso de aprendizaje donde los valores de control y los parámetros de activación se actualizan a la luz de la nueva información como se observa en la figura 5.5

El enfoque global tomado se ilustra mediante el diagrama de bloques de la figura 5.8 .

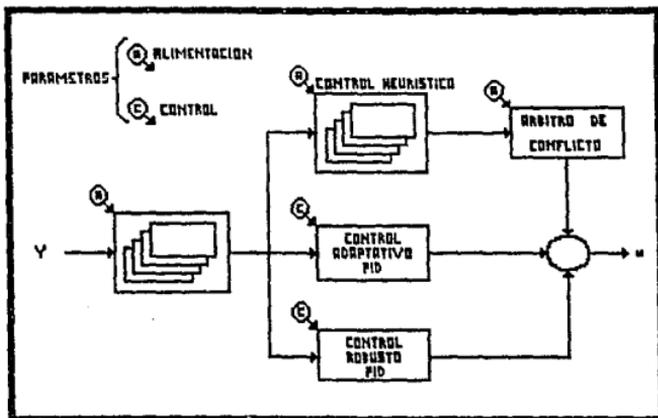


Figura 5.4 Proceso de control (27)

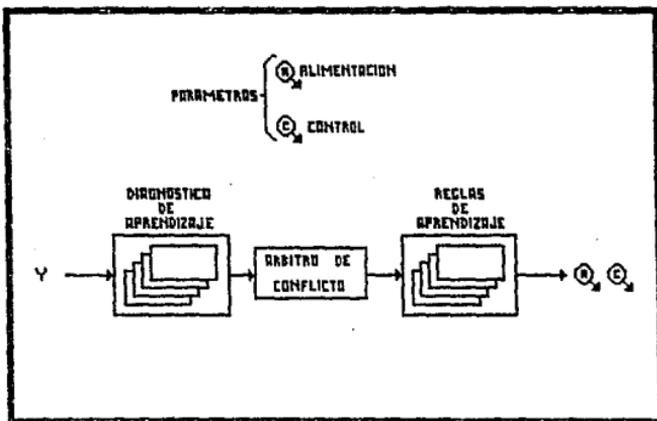


Figura 5.5 Proceso de aprendizaje (28)

(27) Zewin, D. y Zende, R. 1989. op. cit. pag. 277.

(28) Zewin, D. y Zende, R. loc. cit.

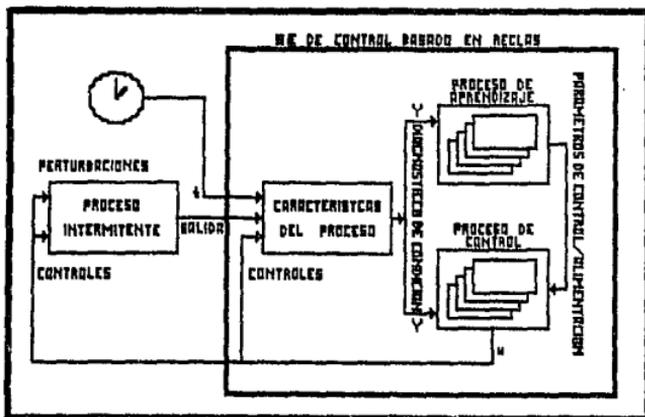


Figura 5.6 Sistema experto de control automático para reactor intermitente (29).

PROCESO DE CONTROL

A cada diagnóstico de condición le corresponde una acción de control predefinida. El avance se determina para cada muestra k ($Av(k)$) en su correspondiente tiempo, los otros valores se toman a intervalos predeterminados de tiempo.

Las estrategias de control para el reactor y el sistema de enfriamiento-calentamiento que deben estar incluidas en el sistema experto se presentan en las tablas I y II respectivamente. Existe una secuencia determinada por el estado del reactor, el orden progresivo de las reglas, el avance de la reacción y la operación en función del tiempo.

(29) Zaidin, S. y Zaida, R. loc. cit.

TABLA I.

Reglas de control

Regla	Descripción	Condición de Activación
C-1	Abrir válvula V6 (vacío).	$P > P1$
C-2	Cerrar válvula V6 (vacío).	$P = P1$
C-3	Abrir válvulas VB (carga/descarga) y V1 (tanque I).	$P = P1$ y $N1 = 1$
C-4	Cerrar válvula V1 (tanque I).	$N1 = 0$
C-5	Abrir válvula V6 (vacío).	$P > P1$
C-6	Cerrar válvula V6 (vacío).	$P = P1$
C-7	Abrir válvula V2 (tanque II).	$P = P1$ y $N2 = 1$
C-8	Cerrar válvula V2 (tanque II).	$N2 = 0$
C-9	Abrir válvula V6 (vacío).	$P > P1$
C-10	Cerrar válvula V6 (vacío).	$P = P1$
C-11	Abrir válvula V3 (tanque III).	$P = P1$ y $N3 = 1$
C-12	Cerrar válvula V3 (tanque III) y cerrar válvula VB.	$N3 = 0$
C-13	Abrir válvula V6 (vacío).	$P > P1$
C-14	Cerrar válvula V6 (vacío).	$P = P1$
C-15	Abrir válvula V13 (nitrógeno-superior).	$P = P1$
C-16	Cerrar válvula V13 (nitrógeno-superior) y encender agitador con $v = VB$ (velocidad baja).	$P = 0$
C-17	Abrir válvula V4 (tanque IV).	$P = 0$ y $N4 = 1$
C-18	Cerrar válvula V4 (tanque IV) y abrir válvula V13 (nitrógeno-superior).	$N4 = 0$
C-19	Cerrar válvula V13 (nitrógeno-superior) y abrir válvula V7 (venteo).	$P = P2$

TABLA I. Continuación

Regla	Descripción	Condición de Activación
C-20	Cerrar válvula V7 (venteo) y abrir válvula V13 (nitrógeno-superior).	P = P3
C-21	Cerrar válvula V13 (nitrógeno-superior) y abrir válvula V7.	P = P2
C-22	Cerrar válvula V7 (venteo) y abrir válvula V13 (nitrógeno-superior).	P = P3
C-23	Cerrar válvula V13 (nitrógeno-superior) y abrir válvula V7 (venteo).	P = P2
C-24	Cerrar válvula V7 (venteo) y abrir válvula V13 (nitrógeno-superior).	P = P3
C-25	Cerrar válvula V13 (nitrógeno-superior) y abrir válvula V7 (venteo).	P = P2
C-26	Cerrar válvula V7 (venteo) y abrir válvula V13 (nitrógeno-superior).	P = P3
C-27	Cerrar válvula V13 (nitrógeno-superior) y abrir válvula V7 (venteo).	P = P2
C-28	Cerrar válvula V7 (venteo) y abrir válvula V13 (nitrógeno-superior).	P = P3
C-29	Cerrar válvula V13 (nitrógeno-superior).	P = P2
C-30	Fijar T* (set-point) en el controlador de temperatura y establecer t = 0 (accionar el cronómetro).	P = P2
C-31	Mantener T* y establecer t = x.	T = T*
C-32	Inicio de reacción t = & y pasar a la regla C-50.	Formación de espuma

TABLA I. Continuación

Regla	Descripción	Condición de Activación
C-33	Abrir V7 (venteo).	$t = (x + 120)$ y no hay inicio de reacción.
C-34	Cerrar V7 (venteo) y abrir V12 (nitrógeno-inferior).	$P = P3$
C-35	Cerrar V12 (nitrógeno-inferior).	$P = P2$
C-36	Inicio de reacción $t = \&$ y pasar a la regla C-50.	Formación de espuma
C-37	Abrir V7 (venteo).	$P = P2$
C-38	Cerrar V7 (venteo) y abrir V12 (nitrógeno-inferior).	$P = P3$
C-39	Cerrar V12 (nitrógeno-inferior).	$P = P2$
C-40	Inicio de reacción $t = \&$ y pasar a la regla C-50.	Formación de espuma
C-41	Abrir V7 (venteo).	$P = P2$
C-42	Cerrar V7 (venteo) y abrir V12 (nitrógeno-inferior).	$P = P3$
C-43	Cerrar V12 (nitrógeno-inferior).	$P = P2$
C-44	Inicio de reacción $t = \&$ y pasar a la regla C-50.	Formación de espuma
C-45	Abrir V7 (venteo).	$P = P2$
C-46	Cerrar V7 (venteo) y abrir V12 (nitrógeno-inferior).	$P = P3$
C-47	Cerrar V12 (nitrógeno-inferior).	$P = P2$
C-48	Inicio de reacción $t = \&$ y pasar a la regla C-50.	Formación de espuma
C-49	Aumentar $T* = (T* + 2)$ y mandar mensaje de "nuevo set-point" (alarma $T*$) y pasar a la regla C-30.	No hay inicio de reacción

TABLA I. Continuación

Regla	Descripción	Condición de Activación
C-50	Mantener T entre ($T^* - 2$ y T^*) y pasar: -si $I = 0$ a la regla C-58 y asignarle el valor de $I = 1$. -si $I \geq 1$ a la regla C-61 y dejarle su valor $I = 1$.	Formación de espuma
C-51	Bajar T^* totalmente (sólo podrá bajar hasta la T del fluido frío) y cerrar V15 (seguridad-Fluido caliente).	T fuera de control con el controlador automático
C-52	Aumentar la velocidad de agitación a $v = VM$ y establecer $t = z$.	T fuera de control con el controlador automático
C-53	Regresar T^* a su valor anterior, abrir V15 (seguridad-Fluido caliente) y pasar a la regla C-50.	$dT / dt < 0$
C-54	Abrir V7 (venteo).	T fuera de control con el controlador automático y $t = (z + 15)$
C-55	Cerrar V7 (venteo) y abrir V16 (1% carga I).	T fuera de control con el controlador automático y $P = 0$ y $N7 = 1$
C-56	Cerrar V16 (1% carga I).	$N7 = 0$
C-57	Pasar a la regla C-53.	$dT / dt < 0$
C-58	Abrir V14 (inicia muestreo).	$t = (\& + 180)$ y $N6 = 0$
C-59	Cerrar V14 y (sacar) analizar la muestra $M(I)$ al tiempo $t(I)$ (determinar $Av(I)$), (termina muestreo, $N6 = 0$).	$N6 = 1$

TABLA I. Continuación

Regla	Descripción	Condición de Activación
C-60	Mantener T entre ($T^* - 2$) y T^*) y pasar a la regla C-61.	$Av \geq 0.95$
C-61	Abrir V14 (inicia muestreo).	$Av < 0.95$ y $t = (t(I) + 120)$
C-62	Cerrar V14, $I = (I + 1)$ y analizar la muestra M(I) al tiempo t(I) (determinar Av(I)), (termina muestreo, $N6 = 0$).	$N6 = 1$
C-63	Mantener T entre ($T^* - 2$) y T^*) y pasar a la regla C-61.	$Av < 0.95$
C-64	Fijar una $T^* = 30$ en el controlador de temperatura y establecer $t = te$.	$Av \geq 0.95$
C-65	establecer $t = tf$ y $m = md$ (viscosidad deseada).	$T = 30$
C-66	Abrir V7 (venteo) y parar el sistema de enfriamiento-calentamiento.	$T = 30$
C-67	Abrir V5 (tanque V) y aumentar la agitación a: - $v = VM$ cuando $v = VB$. - $v = VA$ cuando $v = VM$.	$Av \geq 0.95$
C-68	Cerrar V5 (tanque V) y suspender agitación $v = 0$.	$m = md$
C-69	Abrir V11 (descarga) y VB.	$m = md$
C-70	$t = tv$ (tiempo de reactor vacío).	$NR = 0$
C-71	Cerrar las válvulas V7 (vacío), VB y V11 (descarga).	$NR = 0$ y $t = tv + 15$

TABLA I. Continuación

Regla	Descripción	Condición de Activación
C-72	Establecer las condiciones iniciales para un nuevo lote ($\& = 0, I = 0, Av(I) = 0$).	$t > (tv + 15)$

TABLA II. Sistema de enfriamiento-calentamiento

Regla	Descripción	Condición de Activación
S-1	Abrir válvula V9 (fluido caliente) ($U_e = 0$, $U_c = 1$).	$t \geq 0$ y $T < F1(T^*)$
S-2	$U_c = 1 - (T/T^*)$, $U_e = 0$.	$F1(T^*) = T < T^*$
S-3	Cerrar válvula V9 (fluido caliente) y abrir válvula V10 (fluido frío) ($U_c = 0$, $U_e = (T - T^*)/2$).	$T > T^*$ y $x = t$
S-4	Cerrar válvula V10 (fluido frío) y abrir válvula V9 (fluido caliente) ($U_e = 0$, $U_c = (T^* - T)/2$).	$T < T^*$ y $x = t$
S-5	Continuar.	$t \geq t_c$
S-6	Cerrar válvula V9 (fluido caliente) y abrir válvula V10 (fluido frío) ($U_c = 0$, $U_e = (T^* - T)/2$).	$dT/dt \geq 0$ y $(T^* - 2) = T < T^*$
S-7	Cerrar válvula V10 (fluido frío) y abrir válvula V9 (fluido caliente) ($U_e = 0$, $U_c = (T^* - T)/2$).	$dT/dt < 0$ y $(T^* - 2) = T < T^*$
S-8	Cerrar válvula V9 (fluido caliente) y abrir válvula V10 (fluido frío) ($U_c = 0$, $U_e = 1$).	$dT/dt > 0$ y $T > T^*$
S-9	Cerrar válvula V10 (fluido frío) y abrir válvula V9 (fluido caliente) ($U_e = 0$, $U_c = 1$).	$dT/dt < 0$ y $T < (T^* - 2)$
S-10	T fuera de control con el control automático ($U_c = 0$, $U_e = 1$), pasar a la regla C-S1.	$dT/dt > 0$ y $T \geq (T^* + 5)$
S-11	Abrir válvula V10 (fluido frío) ($U_c = 0$, $U_e = 1$).	$t > t_e$

En la figura 5.7 se presenta la trayectoria "óptima" esperada de T vs t para el control y muestreo de acuerdo a las tablas I y II.

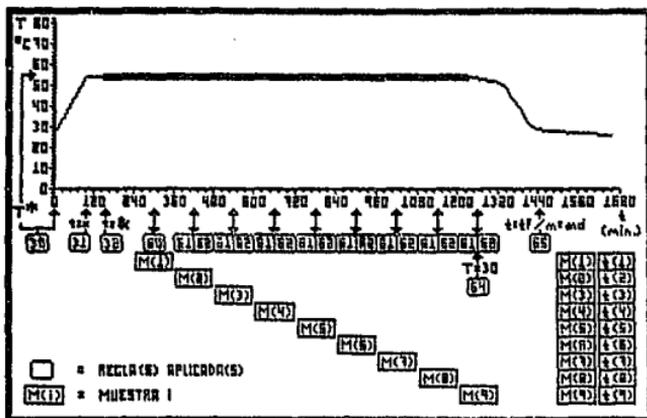


Figura 5.7 Trayectoria "óptima" de acuerdo a las tablas I y II.

Los valores de los parámetros de activación que accionan estas reglas y las intensidades de las acciones de control se modifican mediante aprendizaje a la luz del diagnóstico de condición. El proceso de aprendizaje se estudia a continuación.

PROCESO DE APRENDIZAJE

El sistema experto incrementa su capacidad de controlar en base a los valores deseados para los parámetros de control siguiendo el funcionamiento de los resultados obtenidos en los lotes actual y anteriores conforme al comportamiento representado en las gráficas T vs t y dT/dt vs t , que como se observa en las figuras 5.7 y 5.8, un valor determinado para dT/dt corresponde a cada tiempo en la zona A de la figura 5.4; en el caso de la zona B se pretende que $dT/dt = 0$; y finalmente en la zona C sólo se requiere en cuanto a este criterio que $dT/dt < 0$.

En la tabla III se presentan los diagnósticos de condición, en base a los cuales las características de los antecedentes activan un ajuste en los parámetros para las reglas de control, calculado para mejorar la operación en el siguiente lote. Así, el esquema de control maneja las condiciones cambiantes del proceso (por ejemplo las consecuencias de la incrustación).

TABLA III.

Diagnóstico de condición

tiempo en que ocurre el diagnóstico	Síntomas	No.	Diagnóstico de Condición
0 ≤ t ≤ x (zona A de la figura 5.1)	$T < 0.9T'$ y $t > 0.2x$.	1	"Calentamiento insuficiente"
	$0.9T' \leq T < 0.99T'$.	2	"Desviación negativa"
	$0.99T' \leq T \leq 1.01T'$.	3	"Funcionamiento óptimo"
	$1.01T' < T \leq 1.1T'$.	4	"Desviación positiva"
	$T > 1.1T'$.	5	"Calentamiento excesivo"
x < t ≤ t _e (zona B de la figura 5.1)	$T < 0.95(T^* - 2)$.	1	"Calentamiento insuficiente"
	$0.95T^* \leq T < (T^* - 2)$.	2	"Desviación negativa"
	$(T^* - 2) \leq T \leq T^*$.	3	"Funcionamiento óptimo"
	$T^* < T \leq 1.05T^*$.	4	"Desviación positiva"
	$1.05T^* < T \leq 1.1T^*$.	5	"Desviación positiva en exceso"
	$T > 1.1T^*$.	6	"Temperatura fuera de control"
t _e < t < t _f (zona C de la figura 5.1)	$dT/dt \leq 0$.	1	"Enfriamiento"

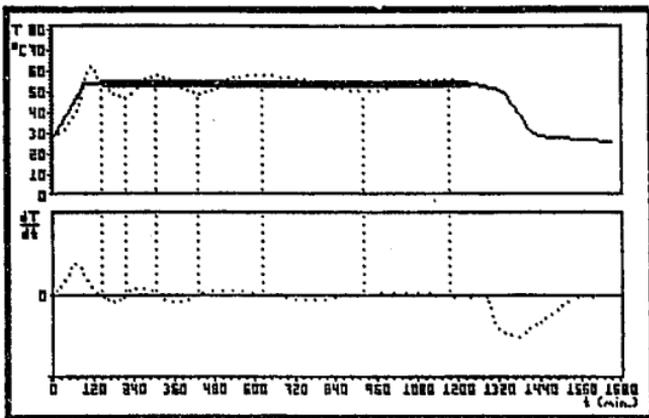


Figura 5.8 T y dT/dt vs t

En la tabla IV se presentan los valores necesarios para las modificaciones cuantitativas en los parámetros de control para el nuevo lote (aprendizaje), las cuales se basarán en los criterios presentados en la tabla V.

En este caso se utiliza un intervalo de 5 minutos entre cada toma de datos para la zona A, para las otras dos zonas este intervalo es de 10 minutos.

TABLA IV Valores necesarios para modificaciones cuantitativas

Zona A	→	$n_i = x_i / 5$
		$R_i = A_i / n_i = 5(A_i) / x_i$
		$R_A = (R_1 + R_2 + R_3) / 3$

Zona B	→	$n_i = (t_e - x_i) / 10$
		$R_i = B_i / n_i = 10(B_i) / (t_e - x_i)$
		$R_B = (R_1 + R_2 + R_3) / 3$

Zona C	→	$n_i = (t_f - t_e) / 10$
		$R_i = C_i / n_i = 10(C_i) / (t_f - t_e)$
		$R_C = (R_1 + R_2 + R_3) / 3$

Finalmente, en la tabla VI se presentan las modificaciones para el mejoramiento de la operación del siguiente lote.

TABLA V. Valores Necesarios para el Aprendizaje.

ZONA	t				T				dT/dt				Diagnóstico de Condición			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
A	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	5	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	x	-	-	-	55	-	-	-	-	-	-	-	-
	x	-	x	-	55	-	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	x	-	-	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
													A1	A2	A3	A4
B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	te	te	-	te	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	te	-	te	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													B1	B2	B3	B4
C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	tf	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	tf	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	tf	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	tf	-	-	-	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
													C1	C2	C3	C4

TABLA VI. Modificación (Aprendizaje).

Diagnóstico de Condición Representativa	Condición de Activación	Descripción
RA	$1 \leq RA \leq 1.6$	$Uc = 1.01(Uc)$
	$1.6 < RA \leq 2.6$	$F1 = F1 + 0.01$
	$2.6 < RA \leq 3.6$	"Funcionamiento Óptimo"
	$3.6 < RA \leq 4.6$	$F1 = F1 - 0.01$
	$RA > 4.6$	$Ue = 1.01(Ue)$
RB	$1 \leq RB \leq 1.6$	$Uc = 1.02(Uc)$
	$1.6 < RB \leq 2.6$	$Uc = 1.01(Uc)$
	$2.6 < RB \leq 3.6$	"Funcionamiento Óptimo"
	$3.6 < RB \leq 4.6$	$Ue = 1.01(Ue)$
	$RB > 4.6$	$Ue = 1.02(Ue)$
RC	Cualquier valor es aceptado, este valor solo se almacena para tener un criterio en caso que se presente alguna tendencia de acuerdo a los valores de diferentes lotes.	

ESTRATEGIAS DE CONTROL CONVENCIONAL ASOCIADAS

CONTROL ESTRICTO DE RETROALIMENTACION

El diseño de control es una actividad basada en modelos. El tipo de estos recorre el espectro completo desde las ecuaciones diferenciales parciales resueltas en un simulador de tiempo real acoplado al proceso, hasta las reglas de sintonía de "regla de dedo" para los controladores PI/PID (proporcional integral/proporcional integral derivativo), que implica aproximaciones de retraso del proceso. Incluso el modelo más complejo es todavía sólo una aproximación de los procesos que serán controlados, así que el diseñador debe asegurarse que los controladores propuestos sean capaces de considerar errores.

Las relaciones entre el tipo de controlador, la incertidumbre del modelo y el funcionamiento de cadena cerrada pueden ser dilucidadas mediante el uso del concepto de "modelo de control interno" presentado por Morari y Zafirou (1989)(30), que consiste de dos etapas, en la primera, el controlador está diseñado para cubrir las especificaciones dadas de funcionamiento nominal, por lo que se asume que el modelo lineal nominal propuesto para el proceso representa las condiciones óptimas. La segunda etapa consiste en añadir un filtro de paso bajo, con el propósito de

(30) Morari, M. y Zafirou. 1989. op. cit. pág. 78.

disminuir el efecto de la incertidumbre del modelo si está relacionada con la frecuencia. Esto tiene el efecto de desintonizar el controlador o, en otras palabras, de disminuir la ganancia del controlador. En sistemas estables de circuito abierto, este procedimiento siempre conduce a funcionamiento aceptable, en modelos grandes la ganancia del controlador podría reducirse.

Sin embargo, en reactores intermitentes exotermicos, que son procesos inestables de cadena abierta, siempre existirá algún límite inferior para la ganancia del controlador que garantice la estabilidad. Por lo tanto la ganancia del controlador tendrá algún límite inferior determinado por la incertidumbre del polo dominante del proceso (que puede ser en principio positivo o negativo porque el reactor permanecerá estable en la etapa posterior al punto de inicio cinético ($t \geq \lambda$)) y algún límite mayor circunscrito por la necesidad de fortalecer la estabilidad en el lado de la mecánica fuera del modelo.

CONTROL ADAPTABLE

Los algoritmos de control se utilizan para manejar variables de proceso (M) en un valor deseado o "set-point" (SETPT). La mayoría de las respuestas de los algoritmos analógicos son función de una o más entradas. Las funciones son operaciones matemáticas o de selección, en contraste, el algoritmo de control funciona conforme al "set-point" y la medición por sí

misma. Pero, existe un error entre estos, lo que ocasiona que ambos, el "set-point" y la medición, tengan igual rango y que su rango posea una influencia significativa en el controlador (salida). Por esta razón todos los controles incluyen una función de autoescala para el error, con lo que el algoritmo automáticamente compensa el valor del rango de salida con mayor rapidez que su rango de medición, lo que asegura que la señal del error esté siempre dentro de los límites del algoritmo de control y que el controlador funcione satisfactoriamente.

ALGORITMO PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO

Para automatización con el algoritmo Proporcional Integral Derivativo (PID) se determina el valor de la salida del controlador como sigue (31):

$$\text{SALIDA} = \text{GANANCIA} * \text{ERROR} + \text{I} * \text{ERROR} + \text{D} * \text{dM/dt} + \text{BIAS} * \text{KBIAS}$$

donde:

$$\text{ERROR} = (\text{SETPT} - \text{M}) * (\text{RANGO-SALIDA} / \text{RANGO-M})$$

M es la variable de medida después de ser escalada conforme al rango de la salida del controlador.

SETPT es el set-point del controlador.

(31) Manual del paquete Yemada. 1989. pág. 4.81 - 4.89

GANANCIA = 100 / P

P es la banda proporcional del controlador, una constante adimensional.

I es el término integral, una constante equivalente al % de repeticiones por minuto. Por ejemplo, un error constante de 10% del rango total de la escala del controlador ocasiona un cambio en la salida de 10% en un minuto si I = 1, y de 20% si I = 2.

D es el término derivativo, una constante equivalente al % de repeticiones por minuto. Por ejemplo, una rapidez constante de cambio en la medida de un 10% por minuto en la escala de salida ocasiona que en la salida haya un cambio de 10% si el término derivativo es 1, el cambio será de 20% si es 2, etcétera.

El valor (BIAS) se multiplica por la ganancia parcial (KBIAS) y se suma a la salida del controlador. El valor de la suma es entonces "filtrado" por los límites alto/bajo de salida (ALTO/BAJO).

El modo aumento/disminución (AUM/DIS), o modo directo significa que una señal medida de incrementos ocasiona una señal de salida de decremento. El modo aumento/aumento (AUM/AUM) o modo indirecto, significa que una señal de incremento ocasiona una señal de salida de incremento; especificando "N" en la configuración AUM/AUM para los parámetros del algoritmo PID se especifica el modo directo.

Cuando el término "seguir" (TRACK) se especifica, la salida del controlador "sigue" el valor alimentado hacia atrás sin considerar el valor del set-point o el valor medido. Durante este modo o en modo manual el controlador automáticamente regresa a calcular el término integral para asegurar menor error al regresar al modo automático.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las capacidades de las computadoras son limitadas, pueden clasificar, seleccionar, comparar y combinar datos y por supuesto, realizar cálculos. También pueden tomar decisiones con base en los datos, todo esto se puede realizar a velocidades mucho muy superiores a las requeridas por una persona. Pero las computadoras no pueden comprender los datos que procesan, no toman iniciativas ni tienen sentido de información ambigua, contradictoria o incompleta, ni pueden operar con información en lenguaje natural. Si bien producen graficas espectaculares, no pueden interpretar la información de manera visual. Su éxito es el derivado de la secuencia de las instrucciones que controlan y los datos sobre los que operan estas instrucciones.

Por tanto, se puede concluir que la computadora es una herramienta muy útil para el desarrollo de la ciencia y la tecnología, en el caso particular de este trabajo, para el desarrollo de los procesos de control. La recomendación en este aspecto se enfoca a la confiabilidad que se puede tener hacia esta herramienta, que si bien no es de un cien por ciento en todos los casos, si se puede incrementar en base a la experiencia hasta lograr una operación satisfactoria.

Las computadoras han llegado a ser las herramientas estándar de las ciencias exactas, son indispensables en todas las ramas de la ingeniería, pero no han ocupado todavía el papel central en muchos campos, donde el saber fundamental no es tan preciso y fácilmente cuantificable. En estas áreas, la última decisión la toma el experto altamente calificado.

Mucho de esto está cambiando conforme se cubren los objetivos de la "quinta generación computacional". En concreto, se ha demostrado que mediante los sistemas expertos es posible transferir una porción de la inteligencia humana a las computadoras en áreas muy específicas. Uno de sus mayores éxitos es la automatización de alguna parte del sentido común. En un problema específico dado, un sistema experto intenta resolverlo y darle al usuario, si lo requiere, una justificación de la línea de razonamiento seguida en dicha solución.

Las perspectivas de desarrollo esperadas en torno de los sistemas expertos son muchas y muy variadas. Su característica estructural de tener separada la base de conocimiento del resto del programa, hace que este tipo de sistemas se pueda aplicar como sistema experto generador para dar solución a nuevos problemas al cambiar una base de conocimiento por otra. Esto significa que los sistemas expertos generadores constituyen un elemento recomendable para la solución a problemas específicos.

Su utilidad es evidente en la industria, de manera que empiezan a ser comunes sus aplicaciones en las más variadas actividades industriales y de la sociedad en general, como resultado del desarrollo de la electrónica y la computación.

La tecnología de los sistemas expertos representa una forma de organizar, conducir y ejecutar las actividades industriales, comerciales y administrativas en una empresa. Desde el punto de vista particular, representan una alternativa de organizar y ejecutar con base en la programación heurística para los casos donde no se tienen modelos matemáticos que describan el comportamiento real de los fenómenos o procesos adecuadamente, como el problema estudiado en este trabajo, la automatización de un reactor intermitente exotérmico, donde el control se realiza por un operador hábil, que con base en mediciones indirectas y de acuerdo con la experiencia establece las acciones de control. Por lo anterior, se afirma que es posible el uso de un sistema experto para sustituir al operador logrando una operación óptima y segura, lo que permite aprovechar los recursos humanos en otras actividades, como por ejemplo supervisión o planeación.

El control de procesos químicos debe observar, fundamentalmente, los siguientes requerimientos:

1. Seguridad
2. Especificaciones de producción
3. Regulaciones del medio ambiente

4. Condiciones de operación

5. Aspecto económico

Al considerar estos requerimientos como objetivos en un proceso, se observa la necesidad de un monitoreo adecuado así como de sistemas de control eficientes.

Esta estructuración permite seleccionar los elementos de hardware necesarios para un sistema de control, y el tipo de computadora adecuada para la aplicación de técnicas de control avanzadas.

En el diseño de un sistema de control es relevante la evaluación de las alternativas de configuración, ya sea con alimentación hacia adelante o hacia atrás.

Los sistemas de control se requieren para: contrarrestar las influencias del medio, asegurar la estabilidad del proceso y/o optimizar su funcionamiento.

La seguridad y la satisfacción de las especificaciones de producción son los dos principales objetivos de una planta; por lo que una vez alcanzados, el objetivo siguiente será maximizar la rentabilidad.

Para establecer el flujo de información entre las unidades de un proceso, es adecuado clasificar las variables de entrada y salida así como el uso de diagramas representativos de la estructura global.

Aunque la operación de un reactor intermitente pueda parecer simple, mediante un análisis detallado se observó que requiere del manejo de una gran cantidad de información.

El problema fundamental en este tipo de reactor consiste en la interpretación de la cinética de reacción, que continúa siendo un problema que debe resolverse casuísticamente, pues conforme al planteamiento presentado, se puede observar la variación de tolerancia para la trayectoria según la sensibilidad de la reacción específica tratada, la pureza de las materias primas, la homogeneidad del sistema, etcétera, a lo cual debe corresponder el planteamiento mismo.

La automatización de decisiones complicadas se ha logrado gracias al desarrollo de las herramientas de inteligencia artificial, lo cual a su vez se ha logrado gracias a los avances en electrónica y computación.

Un sistema experto para control en plantas industriales, se puede aplicar solo a problemas específicos con límites bien definidos, por lo que no es posible formular un sistema de control universal, sino que la solución debe ser implantada caso por caso.

Aun queda mucho por hacer en terminos de generalización de elementos comunes en reactores intermitentes para enriquecer el dominio del conocimiento de reglas de control. En particular merecen atención dos aspectos complementarios relacionados con la escasez de información:

a) El desarrollo de una metodología para la representación de información parcial, que facilite o incremente las alternativas de las acciones de control en el contexto de procesos transitorios donde no se tenga información de variables con importancia determinante (en este caso la composición química).

b) El establecimiento de un cruce sistemático de información para enriquecer los mecanismos de inducción aplicados específicamente a este tipo de reactores.

El problema fundamental de un reactor intermitente exotermico consiste en proporcionar o extraer calor al sistema conforme a la no linealidad termodinamica debida a la rapidez de reacción, lo cual es una característica de cada caso particular de reacción.

Todo lo anterior, sugiere que esta parte de la ingeniería química, referente a los reactores intermitentes, se encuentra en una etapa temprana de su evolución y que en los próximos años, progresará en direcciones aun no definidas, si se apoya en los avances de la instrumentación y control, así como en los futuros desarrollos computacionales.

Algunas aplicaciones de la tecnología de sistemas expertos al control de procesos se presentan en los trabajos de Bailey (1986) (ref. 5), Niida (1986) (ref. 61), y Kane (1987) (ref. 30) y en particular al control de reactores intermitentes en los trabajos de Nisenfeld y Turk (1986) (ref. 50), Blickley (1987) (ref. 50), Cram y Clarke (1988) (ref. 15).

APENDICE A

TABLA I. Algunos sistemas expertos generadores comerciales.

sistema experto	Empresa
ROISE	Rand Corporation Rulemaster.
Duck	Smart Systems Technology.
KEE	Intellicorp.
Knowledge Craft	Carnegie Group.
AGE	Stanford University.
Hearsay III	University of Southern California.
Emycin	Stanford University.
Exsys	Exys, Inc.
Personal Consultant	Texas Instruments.
Rainbow	IBM.
KMS/KES	University of Maryland/Software A & E.
Expert	Rutgers University.
ARBY	Smart Systems Technology.
MECS-AI	Tokyo University.
KAS	Stanford Research International.
TEIRESIAS	Stanford University.
Picon	Lisp Machines, Inc.
M1 / S1	Technowledge, Inc.
ART	Inference Corporation.
Expert Ease	Jeffrey Perrone & Associates.
TIMM	General Research Corporation.

TABLA II. Algunos Sistemas Expertos Comerciales en Uso

Función	Dominio	Sistema	Institución
Diagnóstico	Medicina.	PIP	Massachusetts Institute of Technology (MIT)
	Medicina.	Casnet	Rutgers University
	Medicina.	Mycin	Stanford University
	Medicina.	Puff	Stanford University
	Reparación de computadoras.	DART	Stanford University
	Medicina.	MDX	Ohio State University
	Reparación de computadoras.	IDT	Digital Equipment Corp (DEC)
	Accidentes en reactores nucleares.	Reactor	E6&G Idaho
Análisis de datos	Geología.	Dipmeter advisor	MIT/Schlumberger-Doll Research Center (SDRC)
	Química.	Dendral	Stanford University
	Química.	GAI	Stanford University
	Geología.	Prospector	SRI International Inc.
	Cristalografía de proteínas.	Crysalis	Stanford University
	Determinación de interrelaciones causales en medicina.	RX	Stanford University
	Determinación de interrelaciones causales en medicina.	Abel	MIT

TABLA II. Continuación

Función	Dominio	Sistema	Institución
	Comportamiento del mercado de petróleo.	ELAS	Amoco Corp.
Análisis	Circuitos eléctricos.	EL	MIT
	Mecánica.	Mecho	Edinburgh University
	Operaciones navales.	TECH	Rand Corp./Naval Ocean Systems Center
	Daños en estructuras debidos a terremotos.	Speril	Purdue University
	Circuitos digitales.	Critter	Rutgers University
Diseño	Configuración de sistemas.	XCON/R1	Carnegie-Mellon University/DEC
	Síntesis de circuitos.	SYN	MIT
	Síntetización en química.	Synchem	State University of New York
Planeación	Síntetización en química.	Sachs	University of California (Santa Cruz)
	Robótica.	NOAH	SRI
	Robótica.	Abstrips	SRI
	Genética molecular.	Molgen	Stanford University
	Genética molecular.	SPEX	Stanford University
	Diagnóstico médico.	Hodgkins	MIT

TABLA II. Continuación

Función	Dominio	Sistema	Institución
Aprendizaje a partir de la experiencia	Química.	Metadendral	Stanford University
	Heurística.	Eurisko	Stanford University
Formación de conceptos	Matemáticas.	AM	CMU
Instrucción	Fallas electrónicas.	Sophie	Bolt, Beranek & Newman (BBN)
	Medicina.	Guidon	Stanford University
	Matemáticas.	Excheck	Stanford University
	Plantas de vapor.	Steamer	BBN
Adquisición de conocimiento	Medicina.	Teiresias	Stanford University
	Geología.	KAS	SRI
Construcción de sistemas expertos		Roise	Rand
		AGE	Stanford University
		Hearsay III	University of Southern California
		Emycin	Stanford University
		OPS 5	CMU
		Rainbow	IBM
	Diagnóstico médico.	KMS	University of Maryland
	Consulta médica.	Expert	Rutgers University
Sistemas electrónicos.	ARBY	Smart Systems Technology	

TABLA II. Continuación

Función	Dominio	Sistema	Institución
	Consulta médica.	MECS-AI	Tokyo University
Toma de decisiones	Medicina.	Digitalis Therapy Advisor	MIT
	Radiología.	Raydex	Rutgers University
	Venta de computadoras.	XSEL	CMU/DEC
	Tratamiento médico.	Oncocin	Stanford University
	Configuración de plantas nucleares de energía.	CSA	Georgia Tech.
	Diagnóstico médico.	Reconsider	University of California (San Fco.)
Administración	Producción automatizada.	IMS	CMU
	Administración de proyectos	Callisto	DEC
Entendimiento de imágenes		Visions	University of Massachusetts
		Acronya	Stanford University

APENDICE B

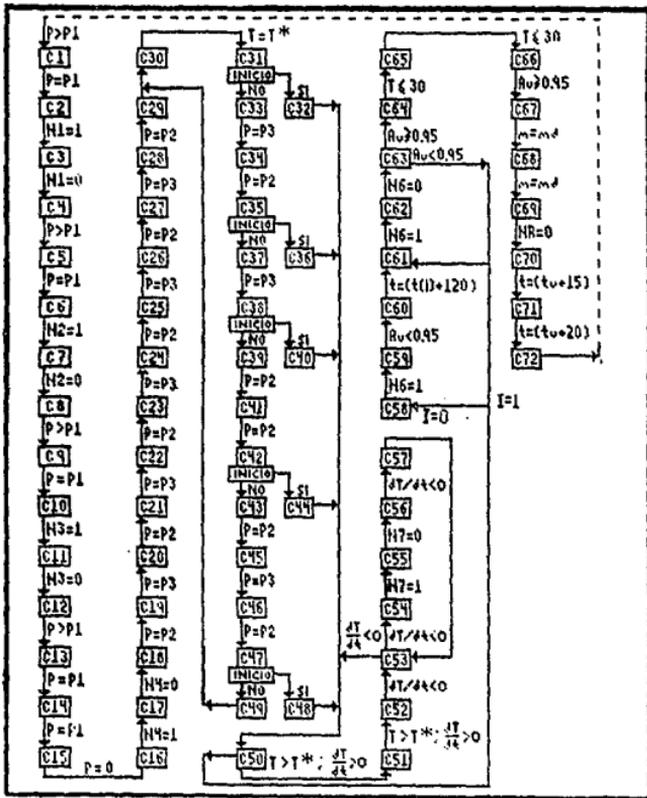


Diagrama representativo de la secuencia de las reglas de control en el sistema experto conforme a la tabla I (página 113).

BIBLIOGRAFIA

1. Adamson, M. y Roberge, P. The Development of a Deep Knowledge Diagnostic Expert System Using Fault Tree Analysis Information, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 69 (2), Canada, 76-80, (Febrero, 1991).
2. Andres Puente, E. y Andres Puente, P. Sistemas Expertos e Industria Quimica, Ingenieria Quimica, 21 (49), Espana, 121-128, (1989).
3. Aris, R. Elementary Chemical Reactor Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 89-94, (1969).
4. Astrom, K., Theory and applications of adaptive control. Chemical Process Control, 19 (3), USA, 471-487, (1983).
5. Bailey, S., Artificial intelligence in industry. Control Engineering, 14 (12), USA, 45-48, (1986).
6. Barnwell, J. y Ertl, B. Expert Systems and the Chemical Engineer, Chemical Engineer, 440 (9), USA, 41-43, (1987).
7. Baur, P., Development Tools Aid in Fielding Expert Systems, Intech, 34 (4), USA, 7-15, (Abril, 1987).
8. Bernold, T. y Hillenkamp, U. (editores), Expert Systems in Production and Services I. Impact on Qualifications and Working Life, Elseviere Science Publishers, Holanda, 53-90, (1991).
9. Bernold, T. y Hillenkamp, U. (editores), Expert Systems in Production and Services II. From Assessment to Action ? Elseviere Science Publishers, Holanda, 17-21, (1991).
10. Bishop, P., Fifth Generation Computers, Parainfo, London, 25-129, (1984).
11. Bonvin, D. y Saner, U., On Line Procedures for Supervising the Operation of Batch Reactors. Computers and Chemical Engineering, 12 (3), USA, 371-376, (1988).
12. Bruce, A. y Thomas, H. (editores), Experts Systems Applications in Chemistry. American Chemical Society, Washington, D.C., 24-53, (1989).
13. Buckley, P., Techniques of Process Control. Jhon Wiley & Sons, New York, 219, (1964).

14. Castellano, E. y McCain, C., Digital Control of a Distillation System, Chemical Engineering Progress, 74 (9), USA, 56-62, (1978).
15. Considine, D., Process Instruments and Controls Handbook, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 214-220, (1974).
16. Cram, R. y Clark, B., Expert System Monitoring and control of a Polymer Plant, IEE Colloquium on Expert Systems in Process Control, Digest No. 1988/47, IEE Savoy Place, London, 43-74, (1988).
17. Daigre, L. y Nieman, G., Computer Control of Ammonia Plants, Chemical Engineering Progress, 70 (6), USA, 170-184, (1974).
18. Daskin, M. Jones, P. y Lowe, T. Rationalizing Tool Selection in a Flexible Manufacturing System for Sheet-metal Products. Operation Research, 38 (6), pp. 1104-1115. USA, Noviembre-Diciembre, 1990.
19. Duda, R. y Shortliffe, E. Expert Systems Research, SCIENCE 220 (59), 261-267, USA, (Abril de 1983).
20. Fernandez, J., Inteligencia Artificial y Sistemas Expertos, Ingenieria Quimica, 21 (249), Espana, 121-128 (Diciembre, 1989).
21. Finn, G., Rules of Thumb for Implementing Expert Systems in Engineering, Intech, 34 (4), USA, 33-37, (Abril, 1987).
22. Foss, A., Critique of Chemical Process Control Theory. AIChEJ, 19 (4), USA, 209-214, (1973).
23. Frost, R., Bases de Datos y Sistemas Expertos, Ed. Diaz de Santos, España, 81-177, (1989).
24. Gevarter, W. Introduction to Artificial Intelligence, Chemical Engineering Progress, 83 (9), USA, 21-36, (Septiembre, 1987).
25. Gygax, R., Chemical Reaction Engineering for Safety, Chemical Engineering Science, 43 (7), USA, 175-177, (1988).
26. Harmon, H. y King, M., Expert Systems, John Willy and Sons, USA, 49-55, (1985).
27. Hugo, P., Steinbach, J. y Stoessel, F., Calculation of the Maximum Temperature in Stirred Tank Reactors in Case of a Breakdown of Cooling. Chemical Engineering Science, 43 (5), USA, 44-51, (1988).

28. Juba, H. y Hamer, J. Progress and Challenges in Batch Process Control, Chemical Process Control, 73 (8), USA, 139-183, (1986).
29. Jutan, A. y Uppal, A., Combined feedforward-feedback servo control scheme for an exothermic batch reactor, Industry & Engineering Chemical Research, 23 (2), USA, 597-602, (1984).
30. Kane, L., AI in processing industries, Hydrocarbon Processing, 65 (6), USA, 55-59, (1986).
31. Kestenbaum, A. y Thau, F., Design Concepts for Process Control, Industrial Engineering Chemical Process, 15 (3), USA, 2-28, (1976).
32. King, P. y Mamdani, E., The application of fuzzy control systems to industrial process, Chemical Process Control, 13 (6), USA, 235-242, (1977).
33. Kiparissides, C. y Shah, S., Self-tuning and stable adaptive control of a batch polymerization reactor, Chemical Process Control, 19 (3), USA, 225-235, (1983).
34. Lake, R., Practical Simulation and Scale-up Methods for Assessing the Cooling of Exothermic Batch Reactions, Chemistry and Industry, 2 (4), USA, 250-255, (1977).
35. Latour, P., Energy Conservation via Process Computer Control, Chemical Engineering Progress, 72 (5), USA, 76-84, (1976).
36. Lee, W. y Weekman, V., Advanced Control Practice in the Chemical Process Industry, AIChEJ, 22 (6), USA, 27-32, (1976).
37. Lein, K. y Weisterberg, A., The Expert Systems Technology, Chemical Engineering Science, 42 (5), USA, 1049-1071 (1987).
38. Leonhard, D., Expertensysteme - Grundlagen und Anwendung zur Auswahl von Kanalsanierungsvarianten, Wasser-Abwasser, 12 (10), Alemania, 674-679, (1991).
39. Lewin, D. y Lavie, R., Designing and Implementing Trajectories for an Exothermic Batch Chemical Reactor, Industry & Engineering Chemical, 20 (9), USA, 267-294, (1989).
40. Luyben, W., Process Modeling Simulation and Control for Chemical Engineers, McGraw-Hill, N.Y., 93-167, (1973).

41. Marcellus, D., Expert System Programming in Turbo Prolog, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 31-57, (1988).
42. Harroquin, G. y Luyben, W., Practical control studies of batch reactors using realistic mathematical models, Chemical Engineering Science, 28 (5), USA, 165-183, (1973).
43. Mavrovouniotis, Michael (Editor). Artificial Intelligence in Process Engineering, Academic Press, USA, 267-294 (1990).
44. McAllister, J., Artificial Intelligence and Prolog on Microcomputers, Academic Press, London, 61-73, (1987).
45. Meyers, Robert, "Encyclopedia of Physical Science and Technology", Vol. 2, Academic Press, N.Y., 1-22, (1987).
46. Mishkoff, H., Understanding Artificial Intelligence, Texas Instruments Information Publishing Center, USA, 31-84, (1986).
47. Morari, M. y Zafiriou, E., Robust Process Control, Prentice-Hall, N.J., 63-82, (1989).
48. Naylor, Ch., Build your own Expert System, International, London, 205-226, (1983).
49. Nisenfeld, A., Applying Control Computers to an Integrated Plant, Chemical Engineering Progress, 69 (7), USA, 45-82, (1973).
50. Nisenfeld, E. y Turk, M., Batch reactor control: Could an expert system help ? Intech, 34 (4), USA, 79-84, (1986).
51. Phillips, S., Seborg, D. y Legal, K., Adaptive control strategies for achieving desired temperature during process start-up, Industry & Engineering Chemical Research, 27 (6), USA, 1437-1449, (1988).
52. Rich, E. y Knight, K., Artificial Intelligence, 2da ed., Mc Graw Hill, N.Y., 34-73, (1983).
53. Roberts, R., The Power of Turbo Prolog (The Natural Language of A.I.), TAB Books, USA, 84-114, (1987).
54. Rowan, N. y Allanheld, A., Practical Guide to Design Expert Systems, International, London, 89-92, (1984).
55. Shinsky, F., Process Control Systems, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 175-179, (1979).

56. Smith, C., Digital Computer Process Control. Intext Educational Publishers, Scranton, Pa., 126-132, (1972).
57. Sripada, N. Fisher, D. y Morris, A., An AI application for process regulation and servo control, Reporte Técnico de la Universidad de Alberta, 19-27, (1986).
58. Stephanopoulos, G., The Future of Expert Systems in Chemical Engineering, Chemical Engineering Progress, 63 (9), USA, 44-51 (1987).
59. Tong, R., A control engineering review of fuzzy systems. Chemical Process Control, 13 (5), USA, 559-569, (1977).
60. Umeda, T. y Niida, K., Process control system synthesis by an expert system, Control Theory and Advanced Technology, 3 (2), USA, 385-398, (1986).
61. Unbehauen, H. (editor). Adaptive Control of Chemical Processes, Prentice Hall, USA, 99-193, (1985).
62. Voller, V. y Knight, B., Expert Systems, Chemical Engineering News, 10 (6), USA, 93-96, (1985).
63. Weiskamp, K. y Hengl, T., A.I. Programing with Turbo Prolog, John Wiley and Sons, USA, 56, (1988).
64. Yang, X. y Okrent, D., A Diagnostic Expert System for Helping the Operation of Hazardous Waste Incinerators, Journal of Hazardous Materials, 26 (6), USA, 27-46 (1991).
65. Zadeh, L., Making computers think like people, IEE Spectrum, London, 26-32, (Agosto, 1984).
66. Control-PID (manual del paquete Genesis), Borland Inc., USA, 4.81-4.89, (1989).