

143  
29.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

CONTROL INDUSTRIAL UTILIZANDO CONTROL  
AVANZADO, SISTEMAS EXPERTOS Y REDES  
NEURALES.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERA QUIMICA  
P R E S E N T A :  
RIOS MARTINEZ LILIA ARACELI

DIRECTOR DE TESIS: HUMBERTO RANGEL DAVALOS.

MEXICO, D. F.



260606

1998.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA



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 esta 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.

**Jurado asignado:**

Presidente    Prof. AUDRY SÁNCHEZ JAVIER

Vocal        Prof. MARTINEZ MONTES JORGE TRINIDAD

Secretario    Prof. RANGEL DAVALOS HUMBERTO

1er. suplente Prof. TEXTA MENA JOSE AGUSTIN


2do. suplente Prof. CHAVEZ CHAVARRIA AMBROSIO

**Sitio donde se desarrolló el tema:**

Eje Central Lázaro Cárdenas No. 152 (antes Av. de los Cien Metros),  
Col. San Bartolo Atepehuacan, Delegación Gustavo A. Madero,  
C.P. 07730, México, D.F.

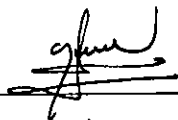
**Nombre completo y firma del asesor del tema**

I.Q. RANGEL DAVALOS HUMBERTO

  
\_\_\_\_\_

**Nombre completo y firma del supervisor técnico**

I.Q.I. GARNICA ZAVALA ROBERTO

  
\_\_\_\_\_

**Nombre completo y firma del sustentante**

RIOS MARTÍNEZ LILIA ARACELI

  
\_\_\_\_\_

## **Dedicatorias:**

A la memoria de mi padre, quien trato de enseñarnos el amor al trabajo, la constancia y esa hambre de conocimiento que me mostró el camino hacia una profesión tan completa y apasionante como la química. Y por haberse convertido en mi mejor amigo.

A mi madre, quien se mantuvo firme para permitirme concluir mi objetivo y por la fe que tiene en todos sus hijos.

A mi bebe que aun no puedo abrazar pero que amo desde el momento en que el milagro de la vida se realizo en mí y con quien aprehendere la desafiante tarea de ser madre.

A Miriam por su amor incondicional, su gran fortaleza, por su juicio tan sensato y todas esas épocas vividas llenas de alegría, risas y pruebas a superar en donde siempre estuvimos y estaremos juntas.

A Ricardo por acullir todas las veces que le pedi su ayuda sin otro deseo mas que el de apoyarme. A Ricky que llego para hacernos sentir la calidez de su presencia inocente y llena de esperanza.

A David por su nobleza, apoyo brindado a todos los que le rodean y sus consejos de hermano mayor. Y a mi pequeño sobrino, Hermes, una prueba mas de todo por lo que vale la pena vivir.

A Ray, Gaby y a todos mis sobrinos que no me dejaron llegar sola, sino que se mantuvieron siempre expectantes ayudándome cuando mas lo necesite.

A Gaby, Sergio, Lulu, Raquel, Silvia mis entrañables amigos del C.C.H. y con quienes viví la época mas inolvidable de mi vida.

A Gabriel Gatica, Mayra Tamayo, Armando, Israel, Claudia López, Yumiko, Violeta; amigos y compañeros de la Facultad.

A todos mis parientes y profesores que fueron parte importante en la forma en que escribí mi historia.

### **Agradecimientos:**

Al Ing. Humberto Rangel Davalos por haberme ayudado como un verdadero amigo y estar conmigo en una etapa en la que se presentaron dos de los hechos mas importantes de mi vida.

Al Ing. Roberto Garnica Zavala por la orientación, apoyo y resolución de los diversos problemas que se presentaron en la elaboración de este trabajo.

A mis sinodales: Aubry Sánchez Javier, Martínez Montes Jorge Trinidad, Texla Mena José Agustín y Chavez Chavarria Ambrosio por sus comentarios y el tiempo que le dedicaron a mi trabajo de tesis.

Al programa de Becas de Tesis de Licenciatura del Instituto Mexicano del Petróleo por la beca proporcionada para la realización de este trabajo.

A todos los profesionales de control de procesos que hicieron posible esta investigación y a todas las personas que saben que han estado vinculadas a este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme sentir el orgullo y compromiso de pertenecer a ella. A la Facultad de Química, gracias a la cual realice el sueño de ser profesionista.

## **INDICE.**

Resumen .....	1
Introducción .....	3
Cap. 1. Generalidades .....	5
Cap. 2. Sistemas de control convencional: evolución y tipos.	
2.1. ¿Cómo y de qué manera se comenzaron a controlar los procesos? .....	11
2.2. Tipos de control convencional .....	28
Cap. 3. Sistemas digitales de control .....	48
Cap. 4. Sistemas de control distribuido .....	57
Cap. 5. Sistemas SCADA .....	73
Cap. 6. Sistemas de control avanzado .....	88
Cap. 7. Sistemas expertos .....	113
Cap. 8. Redes neurales .....	130
Cap. 9. Lógica difusa .....	179
Conclusiones y observaciones.....	213
Bibliografía .....	219



## **RESUMEN.**

El trabajo inicia con una exposición de la importancia de abordar en el control de procesos pero no solo en la instrumentación, sino también en las demás herramientas de que echa mano el control de procesos.

*Capítulo 1. Generalidades:* se establece el porqué de la necesidad de controlar un proceso químico y algunos de los requerimientos necesarios para esto.

En los siguientes 4 capítulos se abordan temas concernientes al control de procesos que sirven para la estabilización. Estos son:

*Capítulo 2. Sistemas de control convencional:* en este se encuentra una revisión histórica de como y de que manera se comenzaron a controlar los procesos así como una breve descripción de los tipos de control convencional utilizados más frecuentemente en la industria.

*Capítulo 3. Sistemas digitales de control:* la importancia de la introducción de la digitalización que puede incluir modos de control convencional pero que con la reducción de costos marca un efecto muy profundo en como fueron controladas las plantas.

*Capítulo 4. Sistemas de control distribuido:* las ventajas sobre los sistemas anteriores, los tipos de arquitectura y los modos funcionales en el sistema son descritos en este capítulo.

*Capítulo 5. Sistema SCADA:* consta de lo que significa un sistema de este tipo, las partes fundamentales y como está integrado, su clasificación y el tipo de procesos donde es aplicado.

Basados en los sistemas anteriores, de forma piramidal el último peldaño del control de procesos le corresponde al control avanzado cuya característica principal es la optimización del proceso partiendo del conocimiento de la dinámica del proceso.

En el *Capítulo 6* se define este control, el ciclo de operación, los beneficios obtenidos, los pasos a seguir para la elaboración de un proyecto sin dejar fuera el estudio costo/beneficio, y algunas de las dificultades que se pueden encontrar en el desarrollo.



En el control avanzado se diferencian tres niveles en las herramientas que este sistema puede utilizar, las que se caracterizan por su grado de complejidad matemática. Tres de estas técnicas son descritas en los capítulos siguientes:

*Capítulo 7. Sistemas expertos:* una herramienta de la inteligencia artificial que se ve fundamentada en la obtención del conocimiento del experto humano para la resolución de problemas. Se describen los beneficios y deficiencias de los sistemas expertos.

*Capítulo 8. Redes neurales:* se mencionan las propiedades de este sistema de procesamiento de información basado en los sistemas nerviosos biológicos, tipos de aprendizaje y conexiones, la manera en la que trabaja una neurona así como toda la red hasta la interpretación de resultados.

*Capítulo 9. Lógica difusa:* el significado de la ambigüedad, los avances y desventajas, un ejemplo ilustrativo, así como el ajuste de la función de conformidad se encuentran contemplados en este último capítulo.





## **INTRODUCCIÓN.**

La teoría, la práctica y la aplicación del control es una disciplina de la ingeniería química, extensa, excitante y muy útil. Fácilmente se puede entender la motivación para un estudio de los sistemas modernos de control.

Las plantas más grandes y complicadas que alimentan a nuestra civilización en sus necesidades básicas: combustible, electricidad, acero, plástico, alimentos, agua, etc. descansan en la instrumentación y el control lo que constituye los nervios y cerebro de los modernos procesos industriales.

El crecimiento en la tecnología digital en los últimos años ha representado un desafío al área de control automático de procesos. Con la creciente disponibilidad de computadoras mucho más poderosas, los enfoques de los sistemas de control han sido reconsiderados, obteniéndose como resultado tecnologías radicalmente diferentes en el campo y entre sus principales ventajas cuenta con la capacidad de hacer los procesos individuales más seguros, más eficientes y con posibilidad de interacción con las variables del medio ambiente económico, de modo que en forma continua es factible hacer que complejos industriales extensos operen en el punto óptimo de rentabilidad o bajo funciones objetivo dictaminadas directamente por la gerencia del complejo.

Mediante la instrumentación y control, se hacen efectivas las exigencias que conllevan al desafío de procesos industriales, mejorando la calidad e incrementando la producción.

Se diseña y automatiza, maquinaria y equipo para la modernización de la empresa, obteniendo beneficios inmediatos como una mayor producción en menor tiempo, mejor calidad y siempre en función de requerimientos específicos.

Se consideran los costos, la confiabilidad, la precisión y la rapidez al momento de seleccionar un mando automatizado. Sin realizar grandes inversiones o modificar totalmente su equipo de planta.



La inteligencia artificial se define como la ciencia que trata de la comprensión de la inteligencia y del diseño de las máquinas inteligentes, es decir, el estudio y la simulación de las actividades intelectuales del hombre (manipulación, razonamiento, percepción, aprendizaje, creación,....).

En la actualidad, la gran cantidad de hardware y software disponible para la industria hace imposible el mantenerse al margen del gran avance que representa la tecnología. Pero se debe tener cuidado en saber aplicar correctamente estas técnicas ya que mientras para un problema puede tener grandes ventajas puede ser enormemente deficiente en otro tipo de problema. De ahí que se pretenda proporcionar una serie de criterios y recomendaciones básicas, adquiridas por las experiencias de los que ya las han puesto en practica.

**Objetivos.** Los objetivos que la tesis pretende cumplir son los siguientes:

- 1.- Establecer los primeros tipos de control que fueron precursores del control avanzado.
- 2.- Reconocer la importancia de la inteligencia artificial en el desarrollo de la industria, más específicamente en el control de procesos.
- 3.- Definir los conceptos y aplicaciones de los sistemas de control avanzado, sistemas expertos, redes neurales y lógica difusa.
- 4.- Analizar las ventajas y desventajas de los sistemas expertos, redes neurales y lógica difusa, como herramientas para el desarrollo del control avanzado.

De acuerdo a los objetivos planteados se considera que el alcance del presente dará una visión amplia de la utilidad del control avanzado, sistemas expertos, redes neurales y lógica difusa dentro de la industria, así como las aplicaciones que ya se están llevando a cabo en el mundo.

Así como también dar de una forma ordenada e integral, los criterios que se deben tomar en cuenta según el problema de control que se quiera resolver, el cual atañe directamente a los Ingenieros Químicos en el desarrollo de su trabajo. Esta trabajo es el resultado de una labor de investigación y recopilación de la información aparecida en manuales de fabricantes, revistas y libros técnicos especializados, conferencias; cuya finalidad es presentar un documento que sea de utilidad practica.





## **CAPITULO 1. GENERALIDADES.**

### **NECESIDAD DE CONTROLAR UN PROCESO.**

La razón de ser de un proceso industrial, ya sea físico o químico, es que en éste se cumplen ciertas características o condiciones de operación necesarias para lograr mantener un equilibrio. Al hablar de procesos químicos se hace referencia a las reacciones químicas que se pueden definir de la siguiente manera: es un proceso en el que se rompen o establecen enlaces químicos. Como resultado de tal proceso se generan un conjunto de sustancias químicas nuevas llamadas productos, a partir de un conjunto de materiales originales llamados reactivos.

En ciertas reacciones químicas llamadas reversibles, los productos originados a expensas de las sustancias iniciales, pueden combinarse entre sí para formarse de nuevo y, como consecuencia de esta propiedad, finalmente alcanzar un estado de equilibrio. En estas condiciones los cambios se realizan simultáneamente a la misma velocidad.

Como ejemplo de las reacciones químicas reversibles tenemos que cuando se hace pasar vapor de agua sobre hierro caliente tiene lugar una reacción que origina óxido ferroso férrico ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y gas hidrógeno. La reacción prosigue hasta que todo el hierro queda convertido en óxido. Pero si se hace pasar hidrógeno sobre el óxido ferroso férrico caliente, se forma



vapor de agua de hierro a consecuencia de la acción reductora del hidrógeno  $3 \text{Fe} + 4 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2$  esta reacción se desarrolla hasta el final reduciéndose por completo el óxido a hierro metálico. En este fenómeno se pone de manifiesto que haciendo variar las condiciones de la reacción, es posible cambiar la dirección del fenómeno.

Otro ejemplo de reacción reversible es el método de Deacon para obtener cloro por medio de la oxidación del ácido clorhídrico en presencia de  $\text{CuCl}_2$  como catalizador:  $4\text{HCl}_{(g)} + \text{O}_{2(g)} \rightleftharpoons 4\text{H}_2\text{O}_{(g)} + 2\text{Cl}_{2(g)}$  en esta reacción, como la doble flecha lo indica, existe la posibilidad de que el HCl se combine con el  $\text{Cl}_2$  para regenerar los reaccionantes. Es por esta razón que deberán encontrarse las mejores condiciones para que se realicen las reacciones deseadas, y lograr un buen rendimiento en los procesos.

Del estudio de las reacciones reversibles puede decirse que una reacción química en general será siempre no cuantitativa, ya que la reacción inversa también se verifica.

Una condición de equilibrio similar se ha encontrado en algunos procesos físicos reversibles que alcanzan un estado de equilibrio dinámico cuando tienen lugar en un sistema cerrado a temperatura constante. Así, el equilibrio entre un líquido y su vapor en un recipiente cerrado es un proceso de este tipo, en el que tienen lugar dos fenómenos opuestos con igual velocidad: evaporación y condensación. Otros ejemplos son: el equilibrio entre un sólido y su vapor, entre la fase sólida y líquida de una sustancia en el punto de fusión y entre el soluto sin disolver y disuelto en una disolución saturada.

Como se mencionó anteriormente, los procesos químicos y físicos están afectados por un cierto número de variables; como la presión, temperatura, flujo de gas o líquido, nivel del líquido, pH, viscosidad, composición química. Las condiciones a la entrada, a la salida y durante el proceso deben medirse física o analíticamente con el objeto de determinar las velocidades, composiciones y tiempos de retención en la tubería y equipos de proceso.

Es así como se puede decir que las *variables de proceso* son cualquier condición o estado del material del proceso o del medio que lo rodea y que está sujeto al cambio.



Para decidir como se controla el proceso, es importante aislar todas las variables y determinar cuáles son independientes y cuales influyen sobre los resultados del proceso lo suficiente para requerir regulación. Ciertas variables permanecerán inherentes a límites adecuados por lo que no necesitan de regulación. Algunas dependerán de otras que fluctúan en una relación concreta, las cuales no requieren de regulación independiente, siempre y cuando se regule las que son dependientes.

Las variables de proceso medidas no suelen constituir por si mismas un fin, sino una indicación del estado de equilibrio del proceso y a veces es simplemente una indicación de la velocidad de la reacción.

Las variables de proceso suelen clasificarse de maneras diferentes: por las características de las mismas ( térmicas, de radiación, de fuerza, de velocidad, de cantidad, de tiempo, propiedades físicas, propiedades químicas, eléctricas ). Otra clasificación es la del tipo de señal de medición. Se ha desarrollado una estadística en donde las cuatro primeras variables que presentan el mayor porcentaje en los circuitos de control de procesos son: temperatura, flujo, nivel del líquido y presión.

Una *planta química* es un arreglo de unidades de proceso (reactores, intercambiadores de calor, bombas, columnas de destilación, absorbedores, evaporadores, tanques, etc.) integrados uno con otro para cierta conversión de la materia prima (entrada de materia prima de alimentación) en los productos deseados usando fuentes disponibles de energía con el más económico de los caminos. Los puntos clave de regulación se seleccionan en los diagramas de flujo del proceso.

La operación de una planta química debe trabajar acorde con aspectos de seguridad y normas ambientales, impuestos por los diseños técnicos, expectativas económicas y sociales en presencia de las modificaciones por las influencias externas (disturbios). Algunos de estos requerimientos son los siguientes:

1. **Seguridad:** un requerimiento primordial en la operación de una planta es la seguridad del personal y del equipo para una contribución continua del desarrollo económico. De eso modo, la presión, temperatura, concentración de químicos, etc. pueden estar limitados.



2. **Especificaciones del producto:** una planta produce una cantidad y calidad deseada de el producto final. Por ejemplo, se requiere la producción de 2 millones de libras de etileno por día, de 99% de pureza. Entonces es necesario un proceso y equipo que garantice esta producción y un sistema de control que sujete al proceso para lograr la calidad del producto.
3. **Regulación ambiental:** varias leyes federales y estatales especifican la temperatura, concentración de los químicos y velocidad de flujo de los efluentes de una planta química dentro de ciertos límites. Tal regulación existe, para las plantas químicas que liberan contaminantes a la atmósfera y en sus corrientes de efluentes que se descargan en ríos y lagos.
4. **Restricciones operacionales:** los variados equipos usados en los procesos tienen restricciones inherentes en su operación. Estas restricciones tienen que satisfacerse a través de la operación de una planta. Por ejemplo, las bombas requieren mantener una cierta cabeza neta positiva de succión; los tanques requieren inundamiento ya que no deben estar secos; las columnas de destilación no deben estar inundadas; la temperatura de un reactor catalítico no debe exceder un límite máximo porque el catalizador puede ser destruido. Los sistemas de control son necesarios para satisfacer completamente esas condiciones de operación.
5. **Económicos:** las operaciones de la planta requiere conformación con las condiciones de mercado, esto es, la disponibilidad de la materia prima y la demanda de los productos finales, de manera que, esto demuestre que es rentable y posible la utilización de la materia prima, energía, capital y mano de obra (labor humana). De ese modo los requerimientos de las condiciones de operación son controladas y llevadas a niveles óptimos de minimización de costos de operación, máximo provecho o ganancia, y así sucesivamente.

Los *sistemas de control de proceso* surgen como una necesidad de sujetar al proceso dentro de sus rangos de diseño; es decir, nace de la exigencia de entregar un producto con los atributos y características de calidad siempre iguales; por ello se tiene un producto con una calidad constante y mejorada, pero no decreciente. El control de un proceso presenta los siguientes objetivos:



- Mantener el proceso a las condiciones de operación requeridas.
- Minimizar las fallas y desviaciones.
- Detectar fallas en el sistema de trabajo; sean de operación, maquinaria, instalaciones o equipo.
- Predecir comportamientos y corregir desviaciones.
- Aprovechamiento máximo de los recursos (equipos, inversiones, servicios auxiliares, etcétera).

Un sistema de control esta constituido por: un monitoreo continuo de la operación de una planta química y la intervención externa ( control ) que garantice la satisfacción de los objetivos de la operación, un arreglo rotacional de los equipos (dispositivos de medición, válvulas, controles, procesadores) y la intervención humana (designación de la planta, operación de planta).

Se tienen tres clases generales de necesidades de un sistema de control para llevarlo a un término satisfactorio:

- supresión de influencias de disturbios externos.
- aseguramiento de la estabilidad de un proceso químico.
- optimización del desarrollo de un proceso químico.

Cuando el diseño de la planta química tiene que ser terminado después de una larga especificación del sistema de control. Se requiere que el sistema de control asegure una operación satisfactoria en la planta. Esto no siempre es posible debido a: (1) el proceso no tiene un número suficiente de variables manipuladas, (2) existen muchas interacciones fuertes entre las unidades de proceso, (3) no es posible hacer frente a todos los disturbios externos, (4) el tiempo de retraso (tiempo muerto) es muy significativo en el proceso y (5) el proceso es inherentemente inestable.

Esta claro que en la selección de un sistema de control se requiere de cierto grado de cooperación y coordinación entre la designación del proceso y la designación del control del proceso. Idealmente, la designación del proceso tiene que mostrar una buena orientación de los problemas de control del proceso y la designación del control de proceso tiene un profundo entendimiento de los aspectos designados en el proceso.



Esto cierra e intercala la interacción entre la designación y el control del proceso que es hecha por un ingeniero químico como el personal más conveniente para comprometerse a la designación del sistema de control para una planta química.

Cuando los procesos químicos por así decirlo simples, con muy pocas interacciones entre las unidades, en su mayor parte por entrega en su arquitectura y muy pocos requerimientos para una operación óptima (en término de utilización de energía y materia prima), la designación de los sistemas de control es mucho más simple.

Actualmente, la descripción es diferente. El súbito costo de la energía y la materia prima; la fuerte competencia en el mercado, la implementación de los estándares de seguridad y polución, y otros más, tienen un fuerte efecto en la construcción de la planta completa que son altamente integrados con muchas y fuertes interacciones a través de las unidades de proceso. Bajo semejantes condiciones la interacción entre designación y control de proceso es muy agudo y las plantas tienen que ser designadas óptimamente. Se debe tener en mente como uno de los principales objetivos de control: el llegar a un control efectivo. Ayudados por una implementación en la sofisticación de la computadora o un simple control neumático.





## **CAPITULO 2. SISTEMAS DE CONTROL CONVENCIONAL: EVOLUCION Y TIPOS DE CONTROL.**

### **2.1. ¿COMO Y DE QUE MANERA SE COMENZARON A CONTROLAR LOS PROCESOS?**

Se obtiene una perspectiva de el control de procesos, al dar un vistazo a el desarrollo histórico de los participantes y las noticias que estos encabezaron en la dirección correcta para permitir el avance del control de procesos.

Se tiene conocimiento de que el primer sistema de retroalimentación inventado en Europa moderna, fue el regulador de temperatura de Cornelis Drebbel (1572-1633) de Holanda. Dennis Papin (1647-1712) inventó el primer regulador de presión para calderas de vapor en 1681, el regulador de presión de Papin fue una especie de regulador de seguridad semejante a la válvula de la olla de presión.

El primer regulador con retroalimentación automática usado por un proceso industrial según se acepta generalmente, fue el regulador centrífugo de James Watt, desarrollado en 1769 para controlar la velocidad de la máquina de vapor. El dispositivo, completamente mecánico media la velocidad de salida del eje y utilizaba el movimiento centrífugo del volante para controlar la cantidad de vapor que entra a la máquina.



Conforme aumenta la velocidad se eleva el volante y se aleja del eje, cerrando así la válvula. Los sobrepesos requieren potencia de la máquina con el objeto de girar y por tanto hacen menos exacta la medición de la velocidad.

El regulador de nivel de agua base de flotador que se dice fue inventado por I. Polzonov en 1765, es el primer sistema histórico dado a conocer por la Unión Soviética. El flotador detecta el nivel de agua y controla la válvula que tapa la entrada de la caldera.

El período que precede a 1868 se caracterizó por el desarrollo de sistemas de control automático inventados intuitivamente. Los esfuerzos para aumentar la exactitud de los sistemas de control condujeron a disminuir la amortiguación de las oscilaciones transitorias. Por consiguiente fue imperativo desarrollar una teoría de control automático. J. C. Maxwell formulo una teoría matemática relacionada con la teoría de control usando el modelo de ecuaciones diferenciales de un regulador. En el estudio de Maxwell se consideró el efecto que tuvieron los diversos parámetros de un sistema sobre su funcionamiento. Durante el mismo período, I.A. Vyshnegradskii formulo una teoría matemática de los reguladores.

El primer trabajo significativo en control automático fue el regulador centrífugo de James Watt, utilizado para el control de la velocidad de una máquina de vapor en el siglo dieciocho.

Otros pasos relevantes en las primeras etapas del desarrollo de la teoría de control son debidos a Minorsky, Hazen y Nyquist, entre muchos otros.

En 1922, Minorsky trabajó en controles automáticos de dirección de barcos y mostró cómo se podría determinar la estabilidad a partir de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema.

En 1932, Nyquist desarrolló un procedimiento relativamente simple para determinar la estabilidad de los sistemas de lazo cerrado sobre la base de la respuesta a lazo abierto con descripción senoidal a régimen permanente.

En 1939, Hazen que introdujo el término "servomecanismo" para los sistemas de control de posición, estudio el diseño de servomecanismos repetidores capaces de seguir estrechamente una entrada cambiante.



Antes de la Segunda Guerra Mundial, la práctica y la teoría de control se desarrollaron en E. U. de América y en Europa Occidental de diferente forma que en la U.R.S.S. y en Europa Oriental.

El control de procesos fue un arte que comprendía aproximaciones por ensayo y error; es no cuantitativo, de mediciones complejas y controla varias partes de un proceso que son independientes una de otra. El control es observado principalmente como una función de instrumentos y hardware, y en cambio el papel del proceso en sí mismo es un factor totalmente ignorado.

Un impulso importante para el uso de la retroalimentación en E.U.A. fue el desarrollo del sistema telefónico y los amplificadores electrónicos con retroalimentación por Bode, Nyquist y Black en los laboratorios de Bell Telephone, quienes para describir la operación de las amplificadores con retroalimentación usaron principalmente el dominio de la frecuencia en términos de amplitud de banda y otras variables de la frecuencia.

En contraste los eminentes matemáticos y los mecánicos prácticos en Rusia estimularon y dominaron el campo de la teoría de control. Por tanto, la teoría rusa tendió a utilizar formulación del dominio del tiempo usando ecuaciones diferenciales.

Durante los últimos años de 1930 y principios de la Segunda Guerra Mundial, el control automático tiene un rápido avance. Casi todos los progresos fueron aplicados en el área militar y están basados en los antiguos trabajos de Nyquist, Black, Minorsky y otros, y en la dirección principal de la trayectoria y mecanismos de trayectoria. Fuera de aquí, la teoría convertida en conocimiento como "teoría de servomecanismo" o "teoría de control por retroalimentación" se desarrollo muy poco.

Casi todas la plantas químicas por así decirlo marchaban esencialmente manuales antes de 1940. Eran necesarios muchos operadores para vigilar el cumplimiento de todas las variables en la planta.



Los grandes tanques que fueron empleados para actuar como amortiguadores de carga entre varias unidades de la planta a través de algún tiempo se volvieron completamente costosos debido a que su función de amortiguamiento de algunos de los disturbios dinámicos no era efectiva en alguna parte del proceso por trastornos ocurridos en alguna otra parte.

Durante la década de 1940 se incrementaron en número y utilidad los métodos matemáticos y analíticos y la ingeniería de control llegó a ser una disciplina completa.

Con el incremento en el costo del equipo, el desarrollo de equipos de mayor capacidad, el alto desarrollo en los procesos que se dio en 1940 y principios de 1950; también debido al antieconómico y frecuentemente imposible puesta en marcha de la planta con aparatos de control automático; y con el estado de control de retroalimentación ( Feedback ) se agregó a la planta una pequeña consideración real de la dinámica del proceso.

Durante la década que comenzó en 1940, los métodos de respuesta a la frecuencia posibilitaron a los ingenieros, el poder diseñar sistemas de control retroalimentado lineal que satisfacían las necesidades de comportamiento.

Desde el fin de esa década hasta los primeros años de la siguiente, se desarrolló completamente el método del lugar de las raíces en el diseño de sistemas de control. Los *métodos de respuesta a la frecuencia y del lugar de las raíces*, que son el corazón de la teoría de control clásica, llevan a sistemas que son estables y que satisfacen un conjunto de requerimientos cuyo funcionamiento es más o menos arbitrario. Pero estos sistemas en general, no son óptimos en ningún sentido significativo.

Desde fines de la década de los 50's, se desplazó el énfasis en la búsqueda de la solución de los problemas de diseño de uno de los muchos sistemas que funcionaban como un sistema óptimo en algún sentido determinado.



A pesar de la gran distribución de trabajo en muchas regiones, las publicaciones eran limitadas pero hasta después de la Segunda Guerra Mundial, cuando textos semejantes a los de Brown y Campell son publicados, y los trabajos pioneros de Odenbourg y Sarturios están disponibles en ingles, es cuando se tiene un impulso. Durante esta era, la más importante obra directa especializada en control de procesos fue la de Ziegler y Nichols que desarrollaron una parte teórica, que parte de un método empírico de caracterización de procesos dinámicos y de determinación del óptimo ajuste de los parámetros del control convencional.

Durante la Segunda Guerra Mundial ( 1 de septiembre de 1939 - 2 de septiembre de 1945 ) se presentó un impulso muy grande para la práctica y la teoría de control automático, ya que fue necesario diseñar y construir pilotos automáticos para aeroplanos, sistemas de localización de cañones, sistemas de control por antena de radar y otros sistemas militares basados en los métodos de control por retroalimentación.

La complejidad y funcionamiento esperado de estos sistemas militares requirió una extensión de las técnicas de control disponible y fomentó el interés en los sistemas de control y el desarrollo de nuevos métodos e ideas.

Alrededor de 1948, unos cuantos individuos exploraron la posibilidad de adaptar servomecanismos de la teoría de control de procesos. Esta teoría, desarrollada extensamente desde las teorías de redes eléctricas, apoyadas en las transformadas de Laplace y Fourier y los métodos de respuesta a la frecuencia por análisis matemático y la designación de los sistemas de control. Permiten producir la relación entre las características de los instrumentos y las características de los procesos.

Completamente establecido se tiene que el control de procesos es obtenido desde la combinación del proceso-instrumentación, no desde una instrumentación única. La llegada de técnicas cuantitativas permiten la posibilidad de designar el sistema de control de proceso y decidir fuera de línea, como trabajaran los sistemas antes de la construcción de la planta.



Es así como la teoría de control tiene una bienvenida entusiasta por muchos ingenieros y los esfuerzos comienzan por la adaptación a los problemas de control de proceso.

Este entusiasmo en muchos casos, rápidamente es desalentado, por dos serias dificultades: (a) hay una casi completa falta de información acerca del comportamiento dinámico de los procesos químicos y (b) muy poco hardware práctico esta disponible para las mediciones en el proceso de la composición de las corrientes del proceso.

Consecuentemente, los primeros estudios de control de proceso frecuentemente son limitados por lo relativo al simple control de flujo, presión y nivel, problemas donde la ecuación de proceso puede ser derivada desde una teoría elemental del mecanismo de los fluidos y donde las mediciones con los equipos apropiados existen.

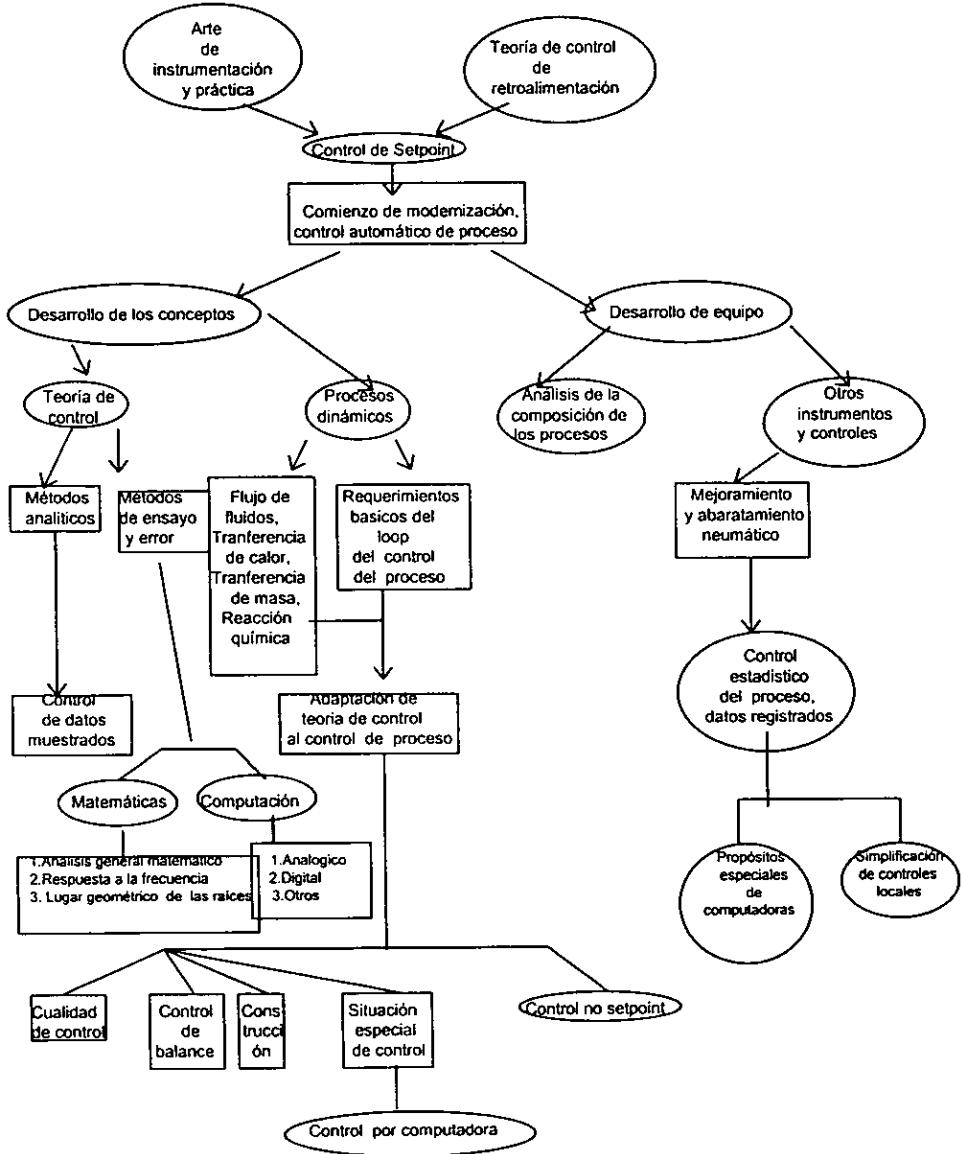
Afortunadamente, el tamaño del progreso ha sido considerable, así como en proceso dinámicos y en el desarrollo del análisis de composición. Para la descripción de el desarrollo, por conveniencia dividiremos en dos categorías básicas y cada una de ellas tiene dos subcategorías.

- |  |  |
|--|--|
| 1. Desarrollo conceptual                               | 2. Desarrollo del equipo                   |
| 1.1. Teoría de control, matemáticas, computación, etc. | 2.1. Análisis de composición en el proceso |
| 1.2. Dinámica de proceso                               | 2.2. Otros instrumentos y controles        |

No es posible implicar, por ejemplo, el desarrollo del equipo con el carente desarrollo conceptual, o ese desarrollo de conceptos tomados en juego por la falta de equipo. No obstante muchos conceptos, por así decirlo, desarrollados con referencia a una clase de hardware, y muchos instrumentos pudieron surgir de involucrarlos con los nuevos conceptos.



FIGURA 2.1. CURSO EN EL CONTROL DE PROCESO.





Generalmente los métodos usados para analizar y designar sistemas de control son divididos en dos amplias categorías: (a) Métodos de prueba y error y (b) métodos analíticos. Estos son los métodos más comúnmente usados.

En los métodos de prueba y error, se ocupa el mismo tiempo para las especificaciones deseadas en el desarrollo y en las ecuaciones que describen el comportamiento de un proceso no-controlado.

Se asume un tipo de control de sistemas con ciertas funciones presentes en el control elemental; se calcula la instrumentación correcta del lugar (por ejemplo, métodos de respuesta a la frecuencia) para tener la estabilidad adecuada; se calcula la respuesta obtenida desde el sistema. Si los resultados no son satisfactorios, se asumen diferentes funciones de control o un diferente sistema de control y recalcula la instrumentación del lugar y la velocidad de la respuesta. Este procedimiento es repetido hasta que los resultados obtenidos son satisfactorios.

En la figura 2.1 se muestra que el método de ensayo y error se divide en dos grandes grupos: uno es principalmente matemático y el otro es principalmente computacional.

En la categoría matemática, cuando se confronta con una nueva situación del control del proceso, la ingeniería típica permite la práctica del ensayo derivado desde la fuente original, ecuaciones básicas a ecuaciones totalmente explícitas para cada variable de salida en términos de cada variable de entrada. Este aprovechamiento matemático de los efectos de dirección es una solución general del problema.

Aunque algunas veces son tediosos los primeros acercamientos, frecuentemente permiten conseguir conclusiones útiles fuera del uso de números, y también permite llegar a una gran simplificación de la computación. En ocasiones subsecuentes, el ingeniero consigue respuestas con el derrumbe de reglas, o consigue soluciones de computadoras más rápidas que facilitan que otra solución sea posible. El uso de la herramienta matemática incluye las transformadas de Laplace, métodos de respuesta a la frecuencia, diagrama de flujo de señales, técnica de raíces de lugar geométrico, la filosofía de redes lineales teóricas.





En la categoría de la computación, se encuentra en la práctica típica la simulación de ecuaciones originales del proceso directamente dentro de una computadora analógica. El ingeniero asume entonces una especie de sistema de control con características dinámicas particulares y simula esto todo el tiempo con las ecuaciones de proceso.

Los parámetros numéricos de la función de control son entonces ajustados por ensayo y error, justamente como un mecanismo de "afinación" en el control de la planta. Este procedimiento tiene el mérito de producir números rápidamente, pero tiene la desventaja de ser de una alta especificación a un problema particular. Frecuentemente los resultados que son considerados de computación, cuando son considerados matemáticamente, son en realidad bastante simples.

Los estudios de ensayo y error depende de la experiencia e imaginación de el ingeniero. La afición básica de este acercamiento es la de que una comparación es obtenida solamente del esquema que es de interés para el ingeniero por medio de ensayos dando lugar a la existencia de mejoras.

Hay algunos interesantes métodos analíticos que especifican el desarrollo deseado, y llevan en una dirección fuera del ensayo y error a funciones de control apropiadas. Algunas de las técnicas de control dato-muestra son casi verdaderos métodos analíticos y son relativamente fácil de usar.

Sin embargo, los procesos analíticos tienen dos defectos: (a) para algunos sistemas se tienen otros de una mejor simplicidad en la computadora pero son completamente opuestos, (b) a través de los procedimientos analíticos conducimos a la función optima a una configuración de circuito de control, estos no predicen, excepto por ensayo y error, la configuración alternativa es optima o mejor.

El procedimiento analítico además predice el mejoramiento de la función por un sistema de control en bypass. Sólo si se desea conocer cual es el mejor (bypass o convencional) deben computarse ambos.



Después de la Segunda Guerra Mundial, con el mayor uso de las transformadas de Laplace y el plano de frecuencia compleja, continuo dominando la teoría del dominio de la frecuencia en el campo del control. Durante la década de 1950 el énfasis en la teoría de la ingeniería de control estuvo en el desarrollo y uso de los métodos en el plano  $xy$ , particularmente, el enfoque de los lugares geométricos de las raíces.

Además durante esa época fue posible la utilización de las computadoras analógicas y digitales como componentes de control. Estos nuevos elementos de control proporcionan una capacidad para calcular con la rapidez y exactitud que no existían antes para el ingeniero de control.

El umbral sensitivo y la velocidad de respuesta de la instrumentación neumática tiene que improvisarse alrededor de diez veces. La versatilidad de los aparatos de computación neumática son vendidos desde 1950, y el número y la variedad son regularmente incrementados.

Paradójicamente, el uso de instrumentos neumáticos de control de proceso comenzó fuertemente antes de usar algunos electrónicos, simplemente una tecnología cuantitativa para neumáticos no existe hasta que se ajusta a lo largo después de la teoría de circuitos eléctricos obteniéndose logros maduros y aplicaciones extensas. El desarrollo de amplificadores de fluidos y control de gases calientes a alta presión son estimulados incrementando el interés en los aparatos neumáticos.

A pesar de que la electrónica y los instrumentos electrónicos de proceso estuvieron disponibles desde aproximadamente 1940, su aplicación extensa no llega hasta 1954. Después de esto, los datos son llevados fuera del proceso por completo en las líneas de instrumentos electrónicos de control de proceso. Estas aplicaciones son un tanto aceleradas por su compatibilidad con registro de los datos electrónicos y computadoras de control de proceso.

Desde la introducción de la instrumentación electrónica a principios de 1950, se incremento notablemente el uso de este en las industrias de proceso. Aún que existía un marcado grado de competencia entre los dos métodos de control. Las mejoras y nuevos conceptos de diseño en cada uno de esos métodos aumenta la dificultad de su comparación.



Desde el punto de vista del rango, es evidente que la instrumentación electrónica continúa ganando aceptación, pero esto no quiere decir que la instrumentación neumática desapareció, ya que existían varios factores que favorecían su uso. Los elementos neumáticos permanecieron como la elección de mucha gente debido a su resistencia al cambio, familiaridad, menor entrenamiento requerido, costo, compatibilidad con instrumentos existentes y confiabilidad probada.

La tendencia de la industria fue cambiar los procesos de fabricación de cargas parciales por procesos continuos, para mejorar la calidad de los productos terminados y el costo de la elaboración de los mismos. Cabe mencionar que los factores que intervienen directamente en ellos son: costo de la materia prima, eliminación de los problemas que siempre existen dentro de los nuevos procesos en operación y en las plantas que los adoptan, los cuales se llegan a eliminar en un porcentaje muy elevado a través de instalaciones de plantas pilotos requeridas para los nuevos procesamientos y poder eliminar o controlar por medio de laboratorios los procesos adaptados.

La importancia de la inspección del control de calidad durante los procesos y las operaciones de acabado de los productos resultantes de la planta, deben ser objetivamente imparciales y realizados por el personal entrenado para tal objeto y que generalmente no debe estar precisamente dentro del control del laboratorio, sino bajo el departamento de producción; para obtener un producto uniforme dentro de ciertos límites de variabilidad.

Las estadísticas fueron consideradas antiguamente como la colección de datos de análisis, cartas de operación de las rutinas dentro de laboratorios, en un tiempo mereció una concepción muy especial, pues lo nombrado anteriormente no es más que una de las verdaderas funciones estadísticas.

El planteamiento de nuevos métodos de análisis, el razonamiento de nuevas observaciones del proceso, indiscutiblemente que partieron de información estadística que sirvieron de base para el desarrollo evitándose pérdidas de tiempo; como también contribuyen con el saber hacia donde conduce el estudio de un método en cuanto a su exactitud aun más se puede dirigir la investigación hacia resultados positivos, ya que basándose en ellos se puede establecer un planteamiento y desarrollo de un caso en particular.



Después de 1950, el desarrollo de analizadores de corriente de proceso como son el infrarrojo, el ultravioleta, el cromatografo de gas, y los tipos de índices de refracción fue fenomenal. Desde soportes, hasta instrumentos tipo laboratorio, se encuentran desarrollados en equipos de planta seguros, aunque su mantenimiento usualmente requiere un adiestramiento especial en las técnicas o la ingeniería. Las aplicaciones para el control automático de proceso es cada vez más extenso excepto para ciertas consideraciones prácticas semejantes a instrumentación sensitiva y especificaciones, rapidez de respuesta, y el muestreo del sistema.

Con el advenimiento del Sputnik (1957) y la era espacial se da otro nuevo impulso a la ingeniería de control. Se hizo necesario diseñar sistemas de control complejo y altamente preciso para proyectiles y pruebas espaciales.

Además, la necesidad de minimizar el peso de los satélites y controlarlos muy exactamente incrementaron el importante campo del control óptimo. Debido a estas necesidades, despertaron gran interés en la última década los métodos del dominio del tiempo debidos a Liapunov, Minorsky y otros.

También L.S. Puntryagin en Rusia y R. Bellman en E.U. A. desarrollaron nuevas teorías de control óptimo. En ese tiempo parece ser que la ingeniería de control debería ser hecha considerando tanto el dominio del tiempo como el dominio de frecuencia simultáneamente en el análisis y diseño de sistemas de control.

En los años 60's la ingeniería química aplica un análisis dinámico y teoría de control de procesos. Casi todas las técnicas adaptadas a partir de el trabajo en el aeroespacio y el campo de la ingeniería eléctrica. En adición a la designación del mejor sistema de control, los procesos de la planta son desarrollados o modificados para facilitar el control, el concepto de examinación de todas las partes de la planta como una unidad simple, que incluye totalmente todas las interacciones, y los proyectos de control de la planta entera son anunciados en el sistema de ingeniería. La corriente popular del mundo sobre la inteligencia artificial y sistemas expertos se vio aplicada en ese tipo de estudios.



Como las plantas modernas poseen muchas entradas y salidas, estas se van haciendo más y más complejas, la descripción de un sistema moderno de control requiere una gran cantidad de ecuaciones. La teoría de control clásica que trata de sistemas de entrada y salida única, se vuelven absolutamente impotentes ante sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas.

Desde aproximadamente 1960, se ha desarrollado la teoría de control moderna para afrontar la complejidad creciente de las plantas modernas y las necesidades rigurosas de la exactitud, peso y costo en aplicaciones militares, espaciales e industriales. Dada la fácil disponibilidad de computadoras electrónicas, analógicas, digitales e híbridas para ser usadas en cálculos complejos, su uso en el proyecto de sistemas de control y en el control de operación de los mismos se convirtió en una práctica habitual.

Se ha tenido un incremento en el uso de los métodos numéricos y computadoras digitales para el estudio de problemas en control y procesos dinámicos. Forrester y sus asociados tuvieron logros significativos en el uso de computadoras digitales para la simulación de sistemas dinámicos de algunas compañías.

Se resolvieron problemas por el uso de computadoras analógicas de alguna parte de un problema y utilizando una computadora digital para el resto. Por ejemplo, Pigford, Lamb y Rippen emplearon una computadora digital en el cálculo de respuesta a la frecuencia del circuito abierto de una columna de destilación, usaron esta información para simplificar la representación de la dinámica de la columna en una computadora analógica, y complementaron el estudio de control de la columna en la computadora analógica.

Semejantes estudios apoyan el empleo de las computadoras híbridas analógicas - digitales por tener muchos alcances, pero las máquinas de este tipo, que no están disponibles todavía comercialmente, estaban ensambladas y tenían que ser usada en investigación experimental.



La teoría de control moderna tiene muchas ventajas sobre la clásica. Establece el diseño de sistemas de multivariables y de sistemas que varían con el tiempo. Permite al ingeniero de control tener en cuenta condiciones arbitrarias iniciales en la síntesis de sistemas de control óptimos, en tales síntesis solo hay que encarar los aspectos analíticos del problema. Se puede programar una computadora digital para realizar todos los cálculos numéricos necesarios. Es importante notar que la teoría de control moderna no reemplaza totalmente a la teoría de control clásica, ambos enfoques se complementan.

El rápido levantamiento de los precios de la energía en los 70's promueve la necesidad adicional de un efectivo sistema de control. La designación y redesignación de muchas plantas a reducir el consumo de energía resulta de la más completa integración de plantas con todas esas interacciones.

De ese modo los cambios en la ingeniería de control de procesos tiene que continuar creciendo durante los años. Estos traen que el estudio de la dinámica y el control mediante los métodos de programación de la ingeniería química cada vez son mas vitales en comparación a los de hace 30 años. Los *procesos dinámicos* son asignados a el comportamiento de la variable con el tiempo del proceso que se encuentran regulados o irregulados y están sujetos a disturbios.

La dinámica microscópica del proceso es aceptada como local o un fenómeno en pequeña escala semejante a turbulencia y difusión. El término es apropiadamente aplicado, por ejemplo, en estudios dirigidos a elucidar mecanismos de reacciones químicas.

La dinámica microscópica del proceso es concerniente a una larga escala o al comportamiento completo del equipo de proceso o el ensamblado de los equipos de proceso; proporciona el beneficio de la información usualmente necesaria para el estudio de sistemas de control.

Se suele dividir el proceso dinámico microscopio en cuatro grupos, cada uno más completo que su predecesor. El primero de estos es el sistema de flujo de fluidos. Estos son sistemas que involucran el flujo de los gases, líquidos y alimentación a través de bombas, tanques y líneas de tuberías.



## CONVENCIONAL.

El siguiente sistema de transferencia de calor, que incluye los intercambiadores de calor convencionales de tubo-coraza y de doble tubo, condensadores, reboiler, chaquetas, y demás. No obstante, casi todo el sistema de transferencia de calor además incluye flujo de fluidos.

El siguiente grupo es el sistema de transferencia de masa. Este incluye fraccionador, extractores, absorbedores, adsorbedores y cristalizadores. No obstante, la transferencia de masa pocas veces toma partido más allá de simultaneidad de transferencia de calor y flujo de fluidos. En el grupo final es el sistema de reacciones químicas. Aquí encontramos transferencia de calor, transferencia de masa y flujo de fluidos como fuentes para la cinética de las reacciones químicas. Un importante aspecto del estudio de los procesos dinámicos es una investigación básica de los requerimientos del control de proceso. Lo inadecuado de la teoría de control convencional se refleja en que frecuentemente resuelve el problema inadecuadamente.

Un importante resultado de semejante estudio es el descubrimiento de que el uso excesivo del control de setpoint es innecesario en muchas situaciones y son intrínsecamente indeseables para otros. Estas direcciones en el desarrollo de otra clase de control de retroalimentación, involucran controles "no - setpoint" y la filosofía de control dinámico del proceso. Además los tiempos perdidos ( atraso en la velocidad, grandes distancia o atraso de transportación ) junto con imprevistos y otras pérdidas estimulan el uso de técnicas de control por acción precalculada y el desarrollo de un método especial para obtener un mejor control en la presencia de tiempos muertos.

***De la automatización de las fabricaciones a la información de los procesos.*** Tratándose de la historia de la automatización, la costumbre es remontarse lejos. Del Renacimiento, se cita a Leonardo da Vinci: los esbozos técnicos dejados de sus pájaros voladores o de su león autómatas. Los siglos XVIII y XIX ven figuras que van en movimiento como el flautista y el tamborilero del mecánico francés Vaucanson. El mismo Vaucanson concibe el molino de seda, movido por dispositivos de control automático. El telar del señor Jacquart utiliza tarjetas perforadas para controlar el movimiento de las agujas.

En materia de producción industrial, el choque verdadero sólo se producirá con motivo de la Segunda Guerra Mundial. Rápidamente se modifican los cuatro componentes base que guían los conceptos de una



maquina: motorización, transmisión, operación y control. La historia que conduce a la serie casi infinita de los métodos electrónicos hecha de añadidos y de abandonos o de recuperación de líneas técnicas que pertenecen a disciplinas distintas. No obstante a grandes rasgos podemos identificar tres eras de la automatización.

- La primera es la que cubre la década de 1950. Ve nacer y consolidarse dos innovaciones fundamentales: la línea de traslado por una parte y la máquina herramienta de control numérico (MHCN).

Esta década es la de la floreciente producción en serie, los estudios del tiempo y movimientos, trabajo fragmentado, banda transportadora y la línea de montaje están en auge. Las investigaciones sobre los soportes técnicos que constituyen la electricidad, la mecánica, la hidráulica, cuenta ya con algunas sólidas realizaciones.

Sin embargo, desde el punto de vista del capital, es decir del ahorro del tiempo y de los costos, el uso de las máquinas herramienta presenta un límite serio: su movimiento sigue siendo dependiente de la habilidad de los obreros altamente calificados, capaces de transformar especificaciones técnicas y representaciones en papel de las piezas que hay que trabajar en modos operarios y manejo de máquinas herramientas.

Para intentar eliminar el obstáculo que constituye la pericia de los obreros calificados, la investigación se concentrará en técnicas de control y de programación de las máquinas. Un ejemplo de esas máquinas construidas, es aquel donde se trata de una máquina herramienta clásica a la cual se asocia una cabina de control, que permite programar el movimiento de las herramientas para efectuar trayectorias cuyo objetivo es imprimir a un bloque de metal o de plástico una forma y características deseadas.

Al contrario la máquina herramienta de control numérico es ante todo una herramienta individual cuyo valor estriba sobre todo en que permite realizar operaciones complejas, relativamente largas, poniendo en juego diferentes tipos de herramientas pertenecientes a la misma máquina, y eso a partir de un mismo programa.

- La segunda es la que va de la década de los sesenta a mediados de la de los setenta. Es la de la información de los controles de proceso, mientras que las innovaciones de la era anterior siguen progresando lentamente.





La novedad no es en la industria de la producción en serie, sino en la industria de la propiedad de la materia es decir en el empleo de cadenas de reacciones físico-químicas, para obtener de la materia propiedades consumibles.

Esto también ocurre en la industria petroquímica donde se trata, por craqueo de moléculas más finas de hidrocarburos. Lo mismo ocurre en la industria electronuclear, dado por fusión o fisión del átomo, se desea obtener energía; y lo mismo por extensión ocurre en la industria del cemento, del acero, del vidrio o del caucho.

Los programas de desarrollo teórico son conocidos. La dificultad que hay que dominar proviene del hecho de que el programa teórico, en ambiente industrial real, no siempre se desarrolla conforme a lo esperado. En efecto, en todo momento reacciones secundarias, fugas, aumentos de temperatura. . . pueden perturbar la evolución normal, alterando o condenando la calidad del producto que se intenta obtener.

En la década de los cincuenta, en ese tipo de industrias, el seguimiento se hace a "ojo", "de oído", "por olfato", de esos miles de cosas que conforman la habilidad del obrero. Y es aquí donde la informática - y ya la electrónica -, hará sus entradas por fases sucesivas.

Los dos momentos importantes pueden ser presentados como sigue: (A) Se tratará primero mediante sensores, de extraer información sobre las reacciones físico-químicas del momento, y de convertirlas en señales (cifras, curvas, etc.) simples y legibles para el operador. Esta información permite limitar sus desplazamientos y sirve de ayuda a sus diagnósticos y a sus decisiones de la conducción, las cuales se hacen siempre de manera manual: acción sobre las válvulas, los manómetros (B) Luego, los dispositivos electromecánicos efectuarán y garantizarán directamente toda o parte de la conducción de las operaciones necesarias para el funcionamiento normal.

La fase siguiente será la de la instauración de cadenas locales de regulación, y de las conexión automática entre esas cadenas locales o entre varias estructuras, donde se fabrican los diferentes elementos que deberán converger para la obtención de un producto final.

- Y finalmente, la nuestra que es la que saca partido de las dos eras precedentes, fusionan sus recursos potenciales, proyectando la automatización: de la microcomputadora. En la década de los 80's, a partir



de microcomputadoras conectadas a las grandes calculadoras que administran las redes de conjunto, se hace posible "llamar" información "hojeando" las bases de datos relativos al desarrollo de las operaciones. Estas herramientas nuevas, de administración del seguimiento de la producción, se añaden o sustituyen las "pantallas ópticas" que materializan de manera simplificada el desarrollo de las operaciones y de los flujos.

## 2.2. TIPOS DE CONTROL CONVENCIONAL.

Un sistema de control es una interconexión de componentes que forman una configuración del sistema, la cual proporciona una respuesta deseada del mismo sistema. La base para el análisis de un sistema es el fundamento proporcionado por la teoría de los sistemas lineales, la cual supone una relación de causa-efecto para los componentes de un sistema. Por tanto, un componente o proceso que vaya a ser controlado puede representarse mediante un bloque como se muestra en la fig.2.2

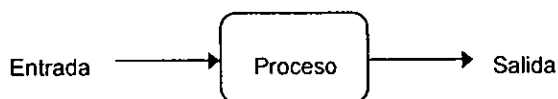


Fig. 2.2. Proceso para ser controlado

*Los cuatro componentes de todo sistemas de control, son:*

1. Sensor, que también se conoce como elemento primario
2. Transmisor, el cual se conoce como elemento secundario
3. Controlador, que es el "cerebro" del sistema de control
4. Elemento final del control, frecuentemente se trata de una válvula de control aunque no siempre. Otros elementos finales de control comúnmente utilizados son las bombas de velocidad variable, los transportadores y los motores eléctricos.

La importancia de estos componentes estriba en que realizan las tres operaciones básicas que deben estar presentes en todo sistema de control; estas operaciones son:



1. *Mediciones (M)*: la medición de la variable que se controla se hace generalmente la combinación de sensor y transmisor
2. *Decisión (D)*: con base en la medición, el controlador decide que hacer para mantener la variable en el valor que se desea
3. *Acción (A)*: como resultado de la decisión del controlador se debe efectuar una acción en el sistema, generalmente esta es realizada por el elemento final de control.

**Sistemas neumáticos.** Fue durante mucho tiempo el sistema normalmente usado en la industria, pero tiene algunas desventajas que deben redondearse en el diseño para reducir sus efectos. Las líneas de transmisión de longitud mayor de 100 m debe tener un retransmisor que acelere la señal.

El aire necesario para los instrumentos se suele suministrar mediante un sistema separado de compresión y deshidratación. El aire debe estar libre de aceite para que no obstruya los instrumentos, y libre de agua para evitar que una congelación de la misma dentro del sistema produzca trastornos.

La presión en línea de distribución, de 7.6 cm de diámetro, es de 5.3 kg/cm<sup>2</sup> con el aire de los instrumentos a una presión de 0.2 a 1.4 kg/cm<sup>2</sup> operando sobre válvulas de diafragma normales. En los sistemas de presión más elevadas deberán usarse diafragmas mayores o dispositivos multiplicadores del aire.

Las señales de presión neumática entre controles e instrumentos son transmitidas por medio de tuberías, usualmente PVC cubiertos de cobre de 1/4 o 3/8 in de diámetro aunque los tubos de polietileno también pueden ser usados en tramos para aplicación no crítica.

La proporción de la señal cambia con el tiempo por medio de la semejanza con el medio y es limitado por la dinámica de las consideraciones correctas, a cien o doscientos metros como máximo. Fuera, los controles neumáticos usualmente son localizados relativamente cerrados por estar asociados a sensores y actuadores, cuando están colocados en un cuarto de control aislado (remoto).



Las características de este sistema de control fueron:

1. El costo instalado es menor para una planta pequeña con distancias de transmisión corta ( hasta 250 ft ).
2. La velocidad de la respuesta es adecuada para la mayoría de las aplicaciones.
3. Los elementos finales de control eran accionados neumáticamente.
4. La confiabilidad era buena.
5. El mantenimiento presenta pocos problemas.
6. La seguridad era excelente.
7. Los accesorios metálicos se seguían mejorando.
8. Los sistemas de control local eran muy económicos.
9. Los estándares de las plantas tendían a mantener una posición técnica respecto a estos sistemas.

La señal neumática se manda por medio de una presión de aire. Este sistema permite una mayor flexibilidad en la transmisión, y era mas versátil que el sistema mecánico ya que el flujo de aire circula por un tubo de pequeña sección transversal y por ende poco peso, lo cual en los cambios de dirección no ofrece problemas como en el caso de la transmisión mecánica.

Las distancias recorridas por las señales en este caso pueden ser mayores que en el sistema mecánico, aunque existen limitaciones debido a las caídas de presión a lo largo de la línea de transmisión.

Los transmisores neumáticos se basan en el sistema tobera-obturador que convierte el movimiento del elemento de medición en una señal neumática. El sistema tobera-obturador consiste en un tubo neumático alimentado a una presión constante  $P_s$ , con una reducción en su salida en forma de tobera, la cual puede ser obstruida por una lámina llamada obturador cuya dimensión depende del elemento de medida.

Los transmisores neumáticos generan una señal neumática que generalmente era variable linealmente de 3 a 15 psi (libras por pulgada cuadrada) para el campo de medida de 0 a 100% de la variable. Nótese que el nivel mínimo de la señal neumática de salida no es cero, sino que vale 3 psi (0.2 kg /cm<sup>2</sup>). De este modo se consigue calibrar correctamente el



instrumento, comprobar su correcta calibración y detectar fugas de aire en los tubos de enlace con los demás instrumentos neumáticos.

Y así, se comprueba rápidamente que un transmisor neumático de temperatura de intervalo de medida 0 - 150 ° C con el bulbo a 0 ° C y con señal de salida 1 psi está descalibrado; si el nivel estándar mínimo de salida fuera de 0 psi no sería posible esta comprobación rápida y para efectuarla habría que aumentar la temperatura hasta detectar presión en la salida.

Asimismo, cuando el conducto neumático que llega hasta el receptor se perfora por accidente, la señal neumática puede llegar a anularse, facilitando la detección de la avería en la lectura del instrumento receptor (en el ejemplo anterior, si el receptor fuera un manómetro de margen 3 - 15 psi con graduación 0 - 150 ° C el índice señalaría un valor inferior al cero del instrumento).

El transmisor de equilibrio de movimiento compara el movimiento asociado al obturador con un fuelle de realimentación de la presión posterior de la tobera. El conjunto se estabiliza según la diferencia de movimiento alcanzando siempre una posición de equilibrio tal que existe una correspondencia lineal entre la variable y la señal de salida. Las placas deben ser livianas, pero bastante fuertes para que no se doblen.

Estos instrumentos se utilizan, en particular, en la transmisión de presión y temperatura donde los instrumentos de medida tales como los tubos Bourdon, manómetros de fuelle, elementos de temperatura de bulbo y capilar que son capaces de generar un movimiento amplio, sea directamente o bien a través de palancas con la suficiente fuerza para eliminar el error de histéresis que pudiera producirse.

Si la fuerza disponible es pequeña, aparte de la histéresis, el tiempo necesario para el movimiento es grande y el transmisor es lento en responder a los cambios de la variable en estos casos se acude a los transmisores de equilibrio de fuerzas en los que básicamente el elemento primario de medida genera una fuerza que se equilibra con otra igual y opuesta, producida por el transmisor.



La transmisión analógica de datos empleando una señal 4 - 20 mA es unidireccional, desde el sensor hasta el sistema automatizado o al actuador. No permite la transmisión de información importante y auxiliar del nivel de control, el cual necesita transmisión bidireccional de datos o comunicación. Todo ello con tecnología convencional implica gran cantidad de cableado a modo de conexión a y desde el sensor para cada canal de datos. A los costos por mayor cableado cabe añadir los correspondientes al alto número de componentes de entrada y salida.

**Sistemas electrónicos.** Las señales que envían los elementos sensores, del tipo de dispositivo para niveles de líquidos o termopares, son señales eléctricas que pueden ser transmitidas, después de ampliarlos adecuadamente, a distancias prácticamente ilimitadas. Esto permite una sensibilidad mucho mayor y elimina los problemas causados por la formación de hielo en las líneas de aire durante las épocas de frío intenso como sucede en los sistemas neumáticos.

En un principio, la desventaja principal era que se debía convertir la señal proporcional de regulación mediante un sistema de válvulas neumáticas, ya que las válvulas accionadas por motores eléctricos que se podrían operar con la señal eléctrica eran demasiado lentas y el desgaste que sufrían era excesivo. Sin embargo, puede usarse directamente una válvula solenoide operada eléctricamente sin necesidad de una conversión al sistema neumático para la regulación del tipo abierto - cerrado.

Los controles electrónicos son usados en circuitos de señal de corriente de dos alambres ( por ejemplo, 4 a 20 mA ) para transmisión pueden ser localizados relativamente lejos de sus instrumentos con pequeños efectos de la impedancia de la intervención de la línea de transmisión o para el tiempo de transmisión, donde, para todos los propósitos prácticos, es instantáneo, los cables multiconductores son usados para tales propósitos. Un avance en los sistemas de dos alambres es que el poder suministrado puede ser localizado en un solo circuito; de ese modo, no se requiere un cableado separado.

El control de niveles de voltaje y las señales de los instrumentos (por ejemplo, 1 a 5 CD) son restricciones mejores a ambientes de laboratorios, donde son encontradas normalmente a distancias cortas. Las resistencias



de las líneas de transmisión tienen que ser tomadas en cuenta para la calibración de los instrumentos. Siempre que las señales de nivel-milivolt sean semejantes a las salidas del termopar (emf), serán particularmente custodiadas más que tomadas. Semejante situación puede llevarse cuando todas las transmisiones de los termopares para un proceso particular son ubicadas en un simple rack, donde introducen una distancia variable para cada sensor. La práctica requiere de muchos cuidados y tiene que ser seguida en el cableado y terminales de señales para prevenir inclinaciones, atenuaciones, o introducción de ruido (por ejemplo, ruido de 60 Hz) en la línea de transmisión. Usualmente se requieren cables coaxiales protegidos para minimizar este efecto.

Como puntos importantes en el funcionamiento de estos sistemas se tienen los siguientes:

1. Los sistemas electrónicos responden más rápidamente por lo que tiene una gran ventaja si se quiere respuesta rápida.
2. Los costos de instalación son probablemente menores para grandes plantas donde las distancias de transmisión son largas (más de 250 a 300 ft).
3. Presentan una interconexión conveniente y económica con las computadoras digitales supervisoras y con sistemas procesadores de datos.
4. La confiabilidad es buena y continuo aumentando.
5. Existe una disminución gradual del costo de componentes electrónicos y subsistemas.
6. La seguridad presenta algunos problemas, sobre todo en atmósferas explosivas.
7. La exactitud era de 0.25 a 1.0 % comparada con la de 0.5 a 1.0 % de los sistemas neumáticos.

Las características de transmisión electrónica se pueden concretar en: (1) tratamiento uniforme de la información, (2) mayor capacidad de transmisión a igualdad de medios físicos, (3) mientras funciona no introduce degradación de la información, (4) facilidad de mantenimiento: cambio de tarjetas y componentes con escaso número de ajustes, (5) mayor economía para utilizar tarjetas o módulos más sencillos y económicos de fabricación.



Esta transmisión tienen una gran ventaja ya que la señal se transmite por conductores entre puntos lejanos, sin tener pérdidas de energía tan grandes como las que existen en la transmisión neumática, y conservando y superando la flexibilidad de esta. La señal se transforma en una corriente o una diferencia de potencial eléctrico por medio de un transductor apropiado.

Los transmisores electrónicos generarán varios tipos de señales: 4 - 20 mA c.c., 1 - 5 mA c.c., 10 - 20 mA c.c., 0 - 5 mA c.c., 0 - 20 mA c.c., 1 - 5 V c.c. Entre estas señales, la más empleada es 4-20 mA c.c. La discrepancia entre los distintos fabricantes hacían que algunos tipos de instrumentos estuvieran preparados para un fácil cambio de valores de la corriente de salida.

La señal electrónica de 4 - 20 mA c.c. al ser continua y no alterna, elimina la posibilidad de captar perturbaciones, está libre de corrientes parásitas, emplea sólo dos hilos que no precisan blindaje y permite actuar directamente sobre miliamperímetros, potenciómetros, calculadores analógicos, etc., sin necesidad de utilizar rectificadores ni modificar la señal.

La relación de 4 a 20 mA c.c. es de 1 a 5 la misma que la razón de 3 a 15 psi en la señal neumática y el nivel mínimo seleccionado de 4mA elimina el problema de la corriente residual que se presenta al desconectar los circuitos a transistores. La alimentación de los transmisores puede realizarse con una unidad montada en el tablero de control y utilizando el mismo par de hilos del transmisor.

El cero vivo con que empieza la señal ( 4 mA c.c. ) ofrece las ventajas de poder detectar una avería por corte de hilo ( la señal se anula ) y de permitir el diferenciar todavía más el ruido de la transmisión cuando la variable esta en su nivel más alto.

Con frecuencia es necesario cambiar de un tipo de señal a otro. Esto se logra por medio de un transductor. Por ejemplo, se puede necesitar cambiar de una señal eléctrica (mA) a una señal neumática (psi). Esto se logra con el uso de un convertidor (I/P) de corriente (I) a presión (P). La entrada de este transductor puede ser de 4 - 20 mA y la salida 3 - 15 psi. Ciertamente, existen muchos tipos de convertidores: P/I, E/P, P/E, etc., donde E se refiere a una señal de tipo voltaje.





## CONVENCIONAL.

Los transmisores electrónicos son generalmente de equilibrio de fuerzas. Consisten en su forma más sencilla en una barra rígida apoyada en un punto sobre la que actúan dos fuerzas de equilibrio:

- la fuerza ejercida por el elemento mecánico de medición (tubo Bourdon, espiral, fuelle . . . ).
- la fuerza electromagnética de una unidad magnética.

El desequilibrio entre estas dos fuerzas da lugar a variación de posición relativa de la barra, excitando un transductor de desplazamiento tal como un detector de inductancia o un transformador diferencial. Un circuito oscilador asociado con cualquiera de estos detectores alimenta una unidad magnética y la fuerza generada reposiciona la barra de equilibrio de fuerzas. Se completa así un circuito de realimentación variando la corriente de salida en forma proporcional al intervalo de la variable del proceso.

Con la tecnología de transmisión analógica, se pierde parte de la resolución del valor medido, proporcionado por el sensor, en primer lugar en la conversión D/A en el sensor y posteriormente en la conversión D/A en el sistema. En comparación, la comunicación electrónica entre el nivel de control y el punto de medida no requiere interpretación de valores de corriente no específicos entre 4 y 20 mA dado que el propio valor medido se transmite directamente en unidades físicas y puede entonces procesarse sin necesidad de otras interpretaciones. Además de la posibilidad de transmitir varios datos debido al tipo de terminales que utiliza el sistema electrónico.

**Sistemas retroalimentados.** La relación entrada - salida representa la relación causa y efecto del proceso, la cual a su vez representa un proceso de la señal de entrada para proporcionar una variable de la señal de salida, frecuentemente con una amplificación de potencia. Un sistema de control con red abierta utiliza un regulador o actuador de control con el objeto de obtener la respuesta deseada según se muestra en la figura 2.3

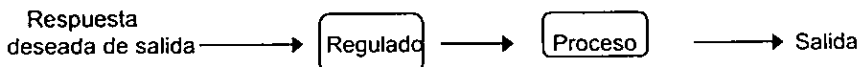


Fig. 2.3. Sistema de control con red abierta



En contraste con un sistema de control con red abierta, uno con red cerrada utiliza una medición adicional de la salida real con el objeto de comparar ésta con la respuesta de salida deseada. En la figura 2.4 se muestra un sistema de control simple con retroalimentación en red cerrada. La definición estándar de un sistema de control con retroalimentación es la siguiente: Un sistema de control con retroalimentación es aquel que tiende a mantener una relación preescrita de una variable del sistema a otro comparando funciones de esta variable y usando las diferencias como un medio de control. El concepto de retroalimentación ha sido la base para el diseño y análisis de los sistemas de control.

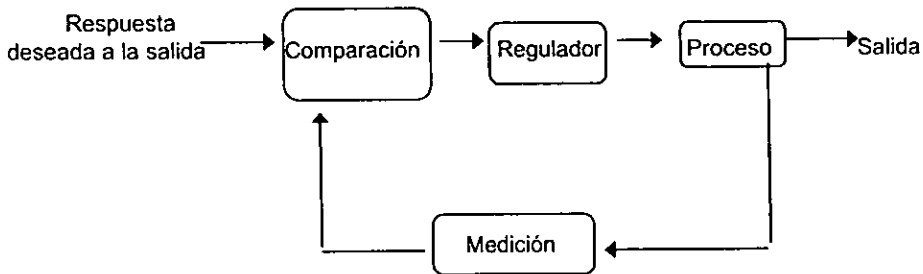


Fig. 2.4. Sistemas de control con retroalimentación de red cerrada

Esta técnica la aplicó por primera vez James Watt hace 200 años, para controlar un proceso industrial, en este procedimiento se toma la variable controlada y se retroalimenta al controlador para que éste pueda tomar una decisión.

La respuesta oscilatoria de muestra que la operación del sistema de control por retroalimentación es esencialmente una operación de ensayo y error hasta que la variable alcanza el punto de control donde permanece posteriormente.

La ventaja: es una técnica muy simple que compensa todas las perturbaciones. Las desventajas: únicamente puede compensar la perturbación hasta que la variable controlada se ha desviado del punto de control, esto es, la perturbación se debe programar por todo el proceso antes de que la pueda compensar el control por retroalimentación.



El control de realimentación es una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida y la entrada de referencia del sistema (o un estado deseado, arbitrariamente variado) y que lo hace sobre la base de esta diferencia.

Aquí solamente se consideran las perturbaciones, a aquellas no previsibles (es decir, las desconocidas de antemano), pues para las que pueden ser predichas o conocidas siempre se puede incluir una compensación dentro del sistema de modo que sean innecesarias las mediciones.

Los *Servomecanismos* es un sistema de control realimentado en el cual la salida es alguna posición o aceleración mecánica. Por tanto, los términos de sistema de control por servomecanismo o de posición son sinónimos. Fueron utilizados en la industria por su funcionamiento totalmente automático de máquinas herramienta con su instrucción programada por ser cumplidos por el uso de servomecanismos.

*Los sistemas de regulación automático* es un sistema de control realimentado en el que la entrada de referencia o la salida deseada son o bien constantes o varían lentamente con el tiempo, y donde la tarea fundamental consiste en mantener la salida en el valor deseado a pesar de las perturbaciones presentes.

**Control regulador.** En algunos procesos la variable controlada se desvía del punto de control a causa de las perturbaciones. El control regulador se utiliza como aquel sistema diseñado para compensar las perturbaciones.

A veces las perturbaciones más importantes es el punto de control mismo, esto es, el punto de control puede cambiar en función del tiempo (lo cual es típico en los procesos por lote), y en consecuencia, la variable controlada debe ajustarse al punto de control; el término servocontrol se refiere a los sistemas de control que han sido diseñados con tal propósito.

En la industria de procesos, el control regulador es bastante más común que el servocontrol, sin embargo el método básico para cualquiera de los dos es esencialmente el mismo.

**Control de lazo cerrado.** Es aquel en que la señal de salida tiene efecto directo sobre la acción de control, esto es, son sistemas de realimentación. Esta acción de control esta basada en la operación de realimentación de la



salida para la comparación con la entrada de referencia, como la acción de control tiene lugar a través de los actos del operador, se puede denominar sistemas de realimentación manual o de lazo cerrado manual.

Si se usa un controlador detector automático en reemplazo del operador humano el sistema de control se vuelve automático, es decir de lazo cerrado automático. Los sistemas de realimentación automática y manual operan en forma similar. Los ojos del operador constituyen el análogo del dispositivo de medición del error; su mente, la del controlador automático y sus músculos el análogo del elemento actuante.

El control de un sistema complejo por un operador humano no es eficiente, por las muchas interacciones entre las diversas variables. Nótese que aun en un sistema simple, un detector automático elimina cualquier error humano de operación. Si se necesita control de alta precisión el control debe ser automático.

Hay numerosos sistemas de control de lazo cerrado en la industria y en el hogar, ejemplo de ello son los refrigeradores de domicilio, los calentadores de agua automático y los sistemas de calefacción hogareña con control termostático.

**Control de lazo abierto.** Son sistemas en los que la salida no tiene efecto sobre la acción del control, es decir, la salida ni se mide, ni se realimenta para comparación con la entrada. Un ejemplo práctico es la máquina de lavar, no se mide la señal de salida, es decir la limpieza de la ropa. Por tanto, para cada entrada de referencia corresponde una condición de operación fijada. Así la exactitud del sistema depende de la calibración.

En presencia de perturbaciones un sistema de control de lazo abierto no cumple su función asignada. En la práctica dichos sistemas sólo se pueden utilizar si la relación entre la entrada y la salida es conocida y no hay perturbaciones ni internas, ni externas.

Nótese que cualquier sistema de control que funcione sobre una base de tiempos es de lazo abierto. Por ejemplo, un control de tráfico para señales actuadas en función de tiempos es otro caso de control de lazo abierto.



Comparación entre los sistemas de control de lazo cerrado y abierto. Una ventaja del sistema de control de lazo cerrado es el uso de la realimentación hace al sistema, en su respuesta, relativamente insensible a perturbaciones externas y a variaciones internas de parámetro del sistema.

De este modo es posible utilizar componentes relativamente inexactos y económicos para lograr la exactitud del control requerida en determinada planta; mientras que esto sería imposible en el caso de lazo abierto. Desde el punto de vista de la estabilidad, el sistema de control de lazo abierto es más fácil de lograr, ya que la estabilidad no constituye un problema importante.

Por otro lado, en los sistemas de lazo cerrado la estabilidad siempre constituye un problema de importancia, por la tendencia a sobre corregir los errores, que pueden producir oscilaciones de amplitud constante o variable.

Para los sistemas en los que las entradas son conocidas previamente y en los que no hay perturbaciones, es preferible usar el control de lazo abierto. Los sistemas de lazo cerrado solamente tienen ventaja si se presentan perturbaciones no previsible y/o variaciones imprevisibles de componentes del sistema.

La magnitud de potencia de salida determina parcialmente el costo, peso y tamaño del servomecanismo ( o inversión de capital, en personal ). Para disminuir la potencia requerida de un sistema, si es aplicable, se puede utilizar control de lazo abierto. Generalmente se logra un control satisfactorio y económico para todo el sistema si se aplica una combinación de ambos.

**Control numérico.** Es un método para controlar los movimientos de los componentes de una máquina usando números. Con control numérico se puede controlar el movimiento de una cabeza cortante con la información binaria contenida en una cinta.

En este tipo de control, se convierten los valores numéricos simbólicos en valores físicos (dimensiones o cantidades) por medio de señales eléctricas (o de otro tipo) que se traducen en un movimiento lineal o circular. Estas señales son: o bien digitales (pulsos) o analógicas (tensiones



variables en el tiempo). Es un sistema de control de lazo cerrado. Una ventaja del control numérico es que se puede producir partes complejas con tolerancias uniformes, a la máxima velocidad de trabajo.

**Control con aprendizaje.** Al intentar analizar sistemas de control de lazo cerrado con operación humana, se encuentra el difícil problema de escribir ecuaciones que describan el comportamiento del ser humano. En este caso uno de los muchos factores que los complican, es la capacidad de aprender del operador humano.

A medida que este va adquiriendo experiencia, se convierte en un mejor elemento de control, y esto debe ser tomado en cuenta al analizar el sistema. Los sistemas de control con capacidad de aprender reciben el nombre de control de aprendizaje.

**Control por prealimentación.** El objetivo es medir la perturbación y compensarla antes de que la variable controlada se desvíe del punto de control; si se aplica de manera correcta, la variable controlada no se desvía del punto de control.

Este sistema solo compensa dos tipos de perturbaciones (temperatura, flujo, calidad de energía de vapor, condiciones ambientales, composición de flujo, contaminación, etc.), si cualquier otra perturbación entra al proceso no se compensa con esta estrategia y puede originarse una desviación permanente de la variable respecto al punto de control. Para evitar esta desviación se debe añadir alguna retroalimentación para compensar todas las demás desviaciones.

En un control por retroalimentación se actúa sobre un error entre el punto de control y la variable controlada, lo cual significa que, una vez que un disturbio entra al proceso, se debe programar a lo largo de todo el proceso y forzar a que la variable controlada se desvíe del punto de control *antes de que se emprenda una acción correctiva* para compensar la perturbación.



## CONVENCIONAL.

En el control por prealimentación, las perturbaciones se compensan *antes de que se afecte* la variable controlada. Específicamente, en este tipo de control se miden los disturbios antes de que entren al proceso y se calcula el valor que se requiere de la variable manipulada para mantener la variable controlada en el valor en que se desea o punto de control.

Si los cálculos se realizan de manera correcta, la variable controlada debe permanecer sin perturbaciones. Para resumir, con el control por prealimentación se compensan los disturbios mayores.

La afinación con retroalimentación se necesita por varias razones, entre las cuales están el hecho de que no siempre se miden y compensan todos los disturbios posibles, la ecuación del controlador por prealimentación no es exacta y la deriva de los instrumentos, por citar algunos; por estas razones el control por prealimentación se complementa con la afinación por retroalimentación y se debe considerar en el esquema de control completo.

$$\text{Salida} = \text{señal por retroalimentación} + \text{señal por prealimentación} + \text{derivación}$$

Este sistema tiene tres limitaciones: (1) el modelo debe ser exacto, incluyendo los elementos dinámicos y las no linealidades, (2) todos los elementos del circuito deben estar perfectamente calibrados y (3) exceptuando la variable prealimentada los disturbios no están considerados.

Las técnicas como: control de razón, control en cascada, control por prealimentación, control por superposición, control selectivo y control multivariable, necesitan para su implementación de cierta capacidad de cómputo con base en microprocesadores; que en el pasado se obtuvo mediante la utilización de relés de cómputo, ya fuera neumático o eléctricos.

En los últimos años, con el advenimiento de las micros, mini, o computadoras de gran escala, se reemplazaron muchos de estos relés de cómputo analógicos. RELÉS DE CÓMPUTO son cajas negras en las que se utiliza algún manejo matemático de señales; en software, los bloques son



los equivalentes de los relés. Algunos de los manejos típicos que se pueden realizar con estos relés de cómputo analógico o bloques de cómputo son los siguientes:

1. Adición/substracción. La señal que se obtiene a la salida es la adición o substracción de las señales de entrada.
2. Multiplicación/división. La señal de salida es el producto o el cociente de las señales de entrada, o ambos.
3. Raíz cuadrada. La señal de salida es la extracción de la raíz cuadrada de la señal de entrada.
4. Selector de abajo/arriba. La señal de salida es la máxima/mínima de dos o más señales de entrada.
5. Limitador de alto/abajo. La señal de salida es la señal de entrada que se limita a un máximo/mínimo precalculado.
6. Generación de función. La señal de salida es una función de la de entrada. Esta función generalmente se aproxima mediante una serie de líneas rectas.
7. Integrador. La señal de salida es la integral, en tiempo, de la señal de entrada. Para el integrador se usan otros términos como totalizadores.
8. Retardo lineal. La señal de salida es la solución de una ecuación diferencial de primer orden cuya función de forzamiento es la señal de entrada; dicho cálculo se describe en forma matemática como sigue: Salida =  $(1 / \tau s + 1)$  Entrada. Este cálculo se utiliza frecuentemente para filtrar una señal ruidosa; la cantidad de filtración depende de la constante del tiempo  $\tau$ ; mientras más grande es la constante del tiempo, mayor es la filtración que se hace.
9. Adelanto/retardo. La señal de salida es la siguiente función de transferencia: salida =  $(\tau_{id} + 1 / \tau_{ig} + 1)$  entrada.

Con el ordenamiento de los sistemas de control con base en microprocesadoras se incrementó tremendamente la disponibilidad de manejos matemáticos más complejos incluso se resolvían ecuaciones mediante dos sistemas de control basados en microprocesadores diferentes.

Es interesante notar que en todos los casos las constantes se limitan dentro de algunos valores prefijados y, puesto que se limitan a las constantes, estas se deben elegir de modo que el cálculo matemático requerido se realice de manera correcta. La manera de elegir los valores de las constantes, se conoce como escalamiento y que es necesario para asegurar la compatibilidad entre la señal de entrada y salida.





El método que se utiliza para escalar se conoce como método de escala unitaria; su utilización es muy simple y se aplica igualmente en los instrumentos analógicos, neumáticos o eléctricos, así como en los sistemas con base en microcomputadoras. El método consta de los tres pasos siguientes:

- a. La ecuación a resolver se escribe junto con el rango de cada variable del proceso a cada una de las cuales se le asigna un nombre de señal.
- b. Cada variable del proceso se relaciona con su nombre de señal mediante una ecuación normalizada.
- c. El sistema de ecuaciones normalizadas se substituye en la ecuación original y se resuelve para la señal de salida.

**Control de razón.** Se supone que se deben mezclar dos corrientes de líquidos, A y B, en cierta proporción o razón, R, esto es,  $R = B/A$ . Un hecho definitivo acerca de este proceso de mezcla es que, aun cuando se puedan controlar ambos flujos, es mas conveniente implementar el control de razón, en comparación con el sistema de control que aparece en la figura 2.5. Ambos sistemas de control se pueden implementar sin los extractores de raíz cuadrada, sin embargo, se utiliza para hacer que el circuito de control se comporte de manera más lineal, de lo cual resulta un sistema más estable.

También se utiliza una razón de flujo aire/combustible, para asegurar que la mezcla de combustible siempre se enriquezca de aire, con lo que se logra una combustión completa y se minimiza la probabilidad de humeo de los gases de escape y cualquier otra condición peligrosa que resulte de las porciones de combustible puro que entren en la cámara de combustión.

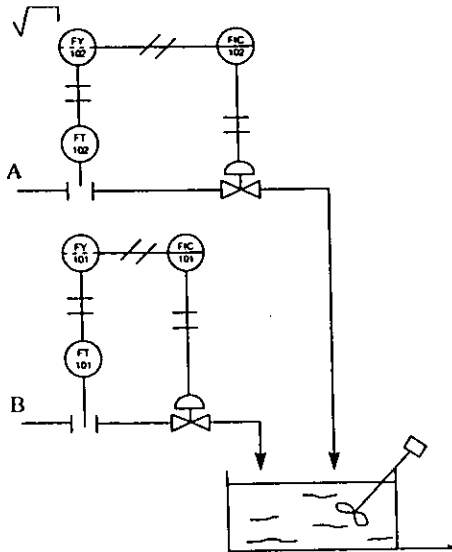


Fig. 2.5. Control de una mezcla de dos corrientes líquidas

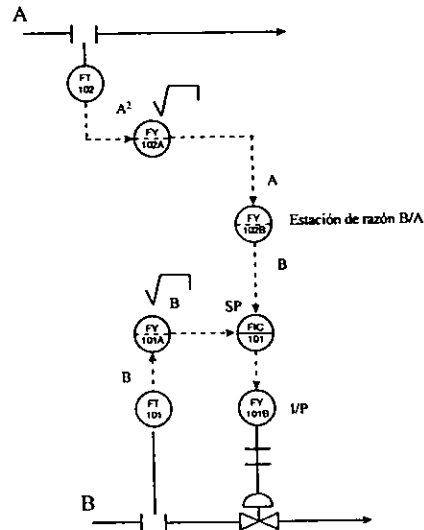


Fig. 2.6. Control de razón del Sistema de mezcla

Los sistemas de relación no están limitados a 2 componentes; un caudal primario puede ajustar varios caudales controlados, cada uno de ellos con relevadores de relación separados y controles individuales. Una variante de este sistema permite ajustar todos los componentes de una mezcla como una fracción del caudal total necesario, el cual puede ser ajustado por un comando maestro.

Los sistemas de relación de caudal son sistemas rápidos que, dinámicamente, se comportan como sistemas de caudal ordinario; sin embargo, los cambios de carga producen errores no recuperables que generalmente no son serios pero que pueden ser eliminados (suponiendo que existe una capacidad corriente abajo) controlando la relación total de caudales en lugar del caudal instantáneo.

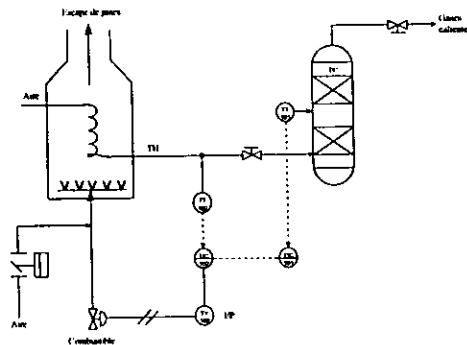


**Control en cascada.** El sistema debe tener dos sensores, dos transmisores, dos controladores y un elemento final de control; de esta instrumentación resultan dos circuitos de control. Con ello se controla la temperatura con la que sale el aire del calentador,  $T_H$ ; con el otro se controla la temperatura de la capa de catalizador,  $T_C$ . De las dos variables controladas, la temperatura de la capa del catalizador es la más importante; la temperatura de salida del calentador sólo se utiliza como una variable para satisfacer los requerimientos de temperatura de la capa de catalizador.

La forma en la que funciona este esquema es la siguiente; con el controlador TIC-101 se supervisa la temperatura de la capa del catalizador  $T_C$ , y se decide la forma de manejar la temperatura de salida del calentador,  $T_H$ , para manejar  $T_C$  en el punto de control. Esta decisión se desvía al controlador TIC-102 en forma de un punto de control; este dispositivo controla entonces el flujo de combustible para mantener  $T_H$  en el valor requerido por TIC-101.

Si en el calentador se introduce alguna de las perturbaciones,  $T_H$  se desvía del punto de control y se inicia una acción correctiva en el controlador TIC-102, antes de que cambie  $T_C$ . Lo que se hace es dividir el retardo total del sistema en dos, para compensar las perturbaciones antes de que se afecte a la variable controlada primaria.

En general, el controlador con el que se controla a la variable principal, TIC-101. En este caso, se conoce como controlador maestro, externo o principal. Al controlador con el que se controla la variable secundaria se le conoce como control esclavo, interno o secundario.





La consideración más importante al diseñar un sistema de control en cascada es que el circuito interno o secundario debe ser más rápido que el externo o primario, lo cual es un requisito lógico. Esta consideración se puede extender a cualquier cantidad de circuitos de cascada; en un sistema con 3 circuitos en cascada, el circuito terciario debe ser más rápido que el secundario, y éste debe ser más rápido que el primario.

Para poner el diagrama de cascada en operación automática y ajustar los controles se pone de adentro hacia afuera, es decir, primero se ajusta el circuito más interno y se pone en automático, mientras que los otros quedan en manual; posteriormente se continúa hacia afuera de la misma manera.

El control en cascada tiene dos funciones: (1) reducir el efecto de los elementos dinámicos en el circuito secundario sobre el sistema total de control, (2) corregir los disturbios que ocurran en los circuitos secundarios antes de que afecten al circuito maestro. El control en cascada no se aplica normalmente en circuitos rápidos de control como el caudal y la presión, es más útil en sistemas de control de temperatura o composición química.

**Control por sobreposición.** Se utiliza generalmente como un control de protección para mantener las variables del proceso dentro de ciertos límites. Otro esquema de protección es el de control entrelazado, el cual se utiliza principalmente como protección contra mal funcionamiento de equipo; cuando se detecta mal funcionamiento, el proceso se detiene mediante el sistema entrelazado.

La acción de control por sobreposición no es tan drástica: el proceso se mantiene en operación, pero bajo condiciones más seguras. Por ejemplo, si por cualquier circunstancia el nivel del tanque baja; no se tendrá suficiente volumen positivo neto de succión (NPSH, por sus siglas en inglés), de lo cual resulta cavitación de la bomba, por lo tanto es necesario diseñar un sistema de control en que se evite esa condición.



Una consideración importante al diseñar un sistema de control por sobreposición es que, si en cualquiera de los controladores existe modo integral de control, también debe existir protección contra reajuste excesivo; la salida del controlador se debe detener en 20 mA y no a un valor más alto. Tan pronto como el proceso regresa a sus condiciones normales de operación, el esquema de sobreposición regresa automáticamente a su estado de operación normal.

**Control selectivo.** Con un poco de lógica, se puede mejorar significativamente la operación de un proceso, en este caso mediante la minimización de las pérdidas de energía para un horno que calienta aceite y donde la operación más eficiente es aquella donde la temperatura del aceite que sale del horno es la justa para proporcionar la energía necesaria a los equipos, con casi nada de flujo a través de la válvula de reciclaje o libramiento; en este caso la válvula de control de temperatura estaría abierta casi completamente.

La válvula de mayor abertura se selecciona mediante la comparación de las señales neumáticas que llegan a cada válvula; en consecuencia, para que esta comparación sea correcta, las características de todas las válvulas deben ser las mismas.

En un reactor catalítico exotérmico de tubo se desea controlar la temperatura del reactor en el punto de mayor temperatura; sin embargo, conforme envejece el catalizador o cambian las condiciones, el punto de mayor temperatura se mueve. En este caso se desea diseñar un esquema de control en donde la variable que ese mide se " mueva " conforme se mueve el punto de mayor temperatura.



## **CAPITULO 3.            SISTEMAS DIGITALES DE CONTROL.**

El rápido desarrollo tecnológico de las computadoras digitales durante los pasados 30 años, contribuyen con una reducción significativa de costos, que tuvo un efecto muy profundo en como fueron controladas las plantas químicas, y las especificaciones futuras de mejoramiento, junto con la sofisticación que esto implica.

Los sistemas de control automático de las plantas para procesos industriales, aún los de las más modernas plantas, pueden reducirse al esquema que se muestra en la figura 3.1; en este sistema, un valor o cantidad (la variable controlada), está siendo continuamente medido y comparado con otro valor (el valor deseado de la variable o set-point), y si no son iguales o están dentro de los límites prefijados (existe un error), se produce una corrección (en la variable manipulada), por medio de la interface automática, pero lleva a la variable controlada a los límites preestablecidos.



Punto de ajuste

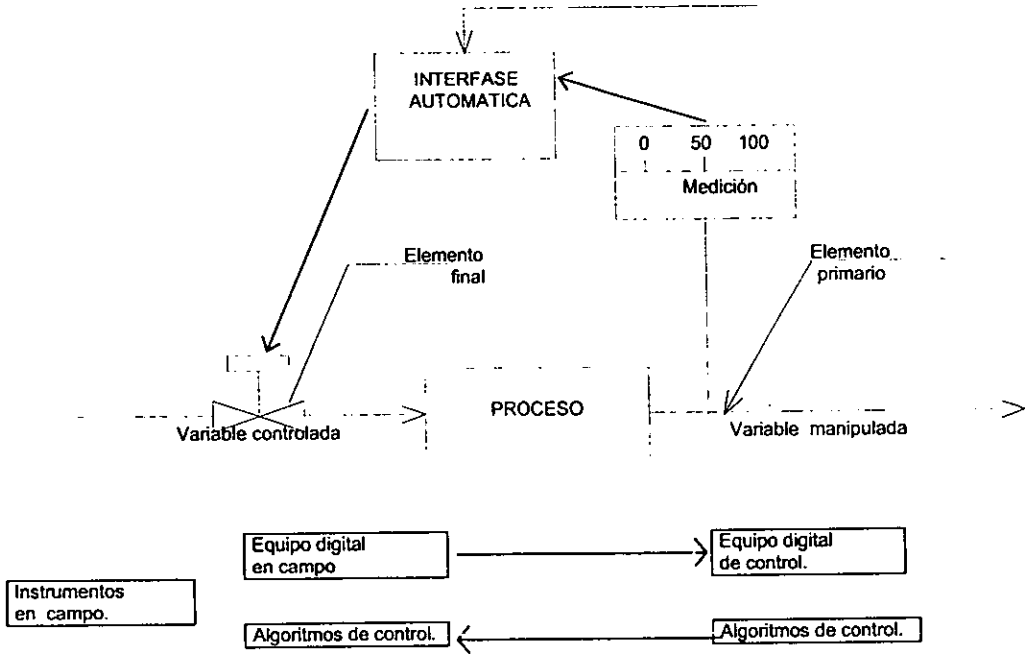


Fig. 3.1. Sistema de control digital.

En la figura 3.2. se ve que la interfase automática del sistema de control se logra a través de una computadora digital electrónica, la que puede incluir los modos de control convencionales, pero también algunos otros; y la interconexión con los elementos de medición y el elemento final de control forman lo que se ha dado en llamar circuitos de automatización. Aquí se pueden considerar otros puntos muy importantes que se refieren a los circuitos de automatización y que son:

- El valor deseado de la variable controlada no depende exclusivamente del operador sino también de la serie de instrucciones que se le haya dado a la computadora digital.
- El esquema de la figura 3.2 representa la interfase automática de un circuito de automatización de un sistema de control digital directo típico, pero existen algunos otros.

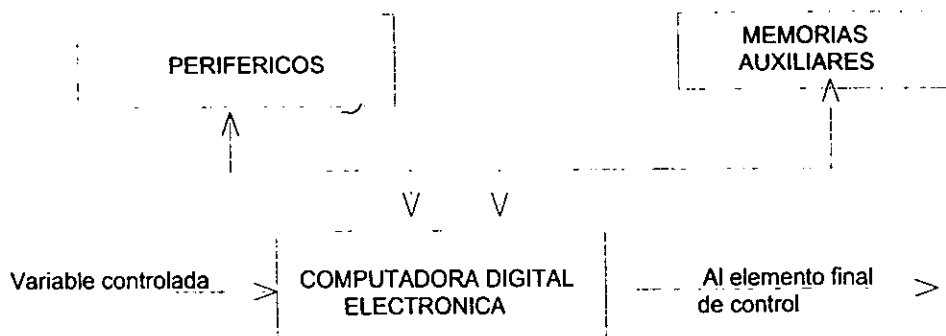


Fig. 3.2. La computadora digital electrónica como la interfase automática de un sistema de control (típico de un sistema de control digital directo).

Las configuraciones posibles de la computadora digital electrónica en el control de los procesos industriales pueden dividirse en dos grandes grupos: sistemas fuera de línea y sistemas en línea, y esto se refiere básicamente a la forma en que la computadora recibe la información del proceso.

En un *sistema fuera de línea* la computadora recibe la información del proceso a través del operador humano, y los resultados del procesamiento de dicha computadora son aplicados también a través del operador humano. La operación implica acumulación de información, demora y procesado por lote.

Un **sistema de control digital (C.D.)** fue un sistema revolucionado en cuanto a las técnicas de control. Las características básicas del C.D. es que se pueden implementar además de las técnicas convencionales de control otras como el control de circuitos múltiples, etc. El concepto de C.D. revolucionó también el empleo de tableros de instrumentación los que pueden complementarse con desplegados en tubos de rayos catódicos y consolas funcionales de operación.



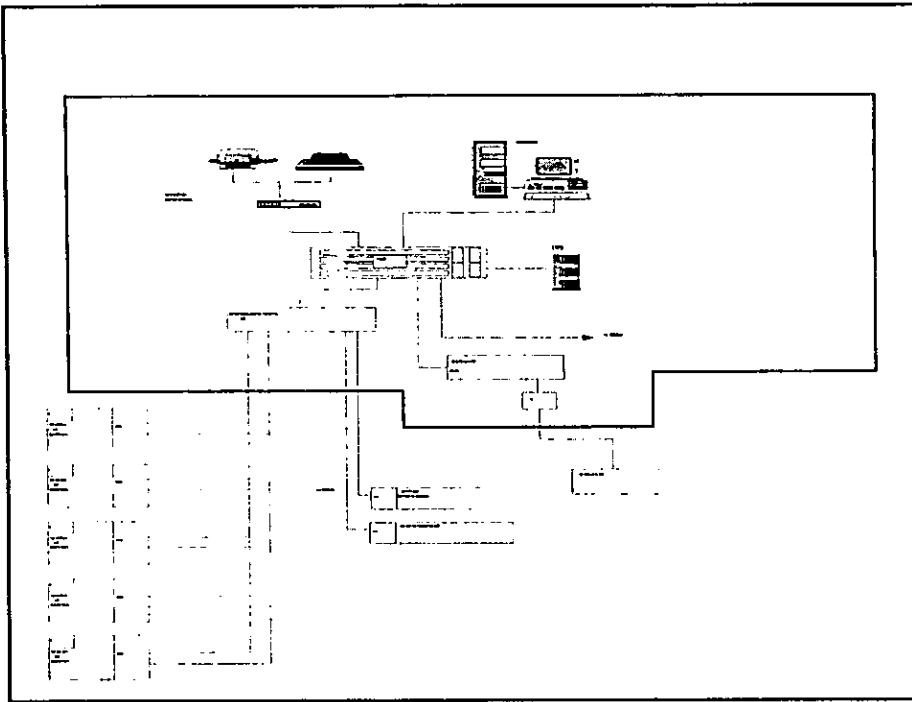


Fig. 3.3. Arquitectura típica de sistema digital.

El sistema en línea, de circuito cerrado, de control digital, tiene a la computadora como controlador y su salida va directamente al elemento final de control. El sistema puede resolverse en dos formas, desde el punto de vista de la instrumentación, una incluye el sistema analógico de soporte con cambio automático en caso de falla de la computadora digital redundante que no lleva controlador universal.

En un proceso típico de multivariables puede haber conexiones de entrada y salida a la computadora digital que sean usadas en diversas formas, resultando una mezcla de entradas fuera de línea y en línea, y de salidas en circuito abierto y circuito cerrado, del tipo de control supervisor o del tipo de control digital directo. La denominación de este sistema es la de nivel más avanzado de sofisticación que se incluya.



Existen sistemas llamados de adquisición de información y control de instrumentación analítica. Estos sistemas vienen siendo de aplicación lateral en un proceso, y se pueden definir como sistemas en línea y circuito cerrado con la instrumentación analítica particular de que se trate.

Siendo el sistema de control digital como se explico anteriormente, el de mayor sofisticación dentro de los primeros sistemas de control automáticos con aplicaciones de computadora digital electrónica, es lógico pensar que fue el que mayores esfuerzos requería tanto desde el punto de vista de trabajo como del costo. La inversión de los equipos de instrumentación, computadora, interfaces campo-computadora y computadora-operador, periféricos, etc. era mayor; así como también lo que se tenía que invertir en el software tanto de aplicación como de computadora. Se hacía necesaria la formación de equipos de trabajo, diseño, operación y mantenimiento, que fueran ganando experiencia en esos aspectos, y esto aparte del aumento en el costo significo más tiempo de labor en el proyecto.

**BENEFICIOS POSIBLES.** La aplicación de la computadora digital electrónica a los procesos industriales significa un esfuerzo considerable, lo cual es cierto en una buena parte; es necesario considerar, por otro lado, el significado que éste tuvo en la operación de la planta, en cuanto a ganancia total. En la mayoría de las operaciones industriales, aún las que contienen sistemas de control automático convencional altamente eficientes.

**TRANSMISIÓN DIGITAL.** Las señales desde instrumentos digitales y controles son frecuentemente transmitidos en formato digital como una consecuencia de pulso on - off. La transmisión puede ser hecha bajo un número de cables paralelos, por ejemplo, cuando el control digital opera un motor escalón para abrir o cerrar la válvula por detección de una secuencia de pulso bajo una o dos señales de línea del motor.

Hasta entonces, los sensores han facilitado información sobre el proceso, o valor medido, en la forma de una señal eléctrica 4-20 mA estándar. Sin embargo, esta señal únicamente transmite la información. El contenido de la información debe ser definido calibrando la señal 4-20 mA. Este valor de corriente, sin embargo, no proporciona un valor medido sino que se trata de información no procesada. La información se procesa en niveles de automatización jerárquicamente superiores, empleando, por ejemplo, PLCs o sistemas de control de procesos (PCS).



De este modo no se dispone de información sobre el estado de los sensores en campo a nivel de control y mando, por consiguiente existe un factor de riesgo en cuanto a seguridad en planta y seguridad de operación. El diagnóstico remoto del sensor o el mantenimiento preventivo del aparato, el cual es imprescindible para la seguridad de la planta, no es posible.

Recientemente los sistemas de instrumentación utilizan transmisiones digitales sobre una señal de datos transmitidos, usualmente un cable coaxial que es conectado en serie o cadena daisy (serie con un circuito completo) al estilo de todos los instrumentos y controles. Un segundo cable coaxial es usualmente instalado para respaldo.

Una microcomputadora reforzada en cada instrumento o control es responsable de una comunicación periódica desde el envío, de cada información directa o búsqueda de información desde algún otro aparato.

En la tecnología de medición moderna de hoy en día, existen microprocesadores que emplean el procesamiento de señal digital para incrementar su eficacia. Estos son los llamados inteligentes. Estos sensores son ostensiblemente superiores a los sensores convencionales y las ventajas para el usuario son obvias.

Al emplear mayor información y mayor calidad, el control de proceso se simplifica, y situaciones de falla y de servicio se encuentran sobre un mayor control. Un ejemplo es el sistema de autovigilancia continuo. Un transmisor de presión diferencial controla la electrónica de evaluación y el estado del sensor, el cual en este caso es un sensor cerámico. En caso de falla, por ejemplo a causa de un cambio indefinido de temperatura en el proceso, aparece un mensaje de diagnóstico, permitiendo así una rápida respuesta a nivel de control de proceso.

Además de mejores valores medidos, los transmisores inteligentes también ofrecen otras ventajas que permiten que el preprocesado de la señal se realice en el interior del sensor. En el sentido más amplio, estos transmisores (Smart) son aquellos instrumentos que tienen inteligencia integrada. Son capaces de medir con gran exactitud y operar en un rango de medida calibrado. Pese a todo, se emplearon como transmisores convencionales con una señal de salida de 4 a 20 mA. Tales transmisores tienen unas ventajas limitadas dado que no tienen una conexión a un sistema digital. Esto significa que información adicional permanece en el sensor.



Esta desventaja ha llevado al desarrollo de una clase mas especifica en el cual las señales digitales se sobreponen a la señal de corriente. Así se conectan unidades de evaluación al cable de señal donde intercambiará datos con el sensor. Ejemplos típicos son las terminales portátiles o los sistemas que emplean PCs con Modems. De eso modo la información adicional procedente del sensor está al alcance de la unidad de evaluación utilizando señales digitales.

Así, con sistemas remotos se puede utilizar un análisis de error, se pueden variar los rangos de medida e incluso información si se sustituyen las unidades.

La tecnología de transmisión inteligente conecta sistemas de salida analógica convencionales permitiendo el acceso a la información adicional que se encuentra en la instrumentación de campo. Esto significa que los equipos existentes (conexiones, plotters, unidades de indicación, PLC, PCS) pueden seguir utilizándose.

Estos componentes no se ven afectados por la superposición de las señales digitales. Por lo tanto, los transmisores inteligentes deberían ir sustituyendo a los transmisores convencionales que se emplean en la actualidad.

Reemplazando los cables, muchos alambres, y tuberías típicas establecidas en los viejos sistemas de control con varios cables coaxiales o cables de fibras ópticas que tiene gran simplificación de la instalación y problemas de mantenimiento. Este aprovechamiento reduce los costos asociados de los sistemas de instrumentación digital.

Las ventajas económicas se hacen evidentes al utilizar la moderna tecnología de campo con los transmisores inteligentes. Al considerar todos los costos que conlleva la vida de una planta industrial - el diseño, la puesta en marcha, el mantenimiento...- se hace patente la efectividad de la tecnología de medición moderna.

Sin ir mas lejos el costo por cableado entre el sistema de medida y el control de campo son obviamente inferiores. El cableado bus no solo reduce costos sino que ha dejado de ser una posible causa de error. Es bien



conocido que los puntos terminales acostumbran ser problemáticos dado que pueden originarse errores en la puesta en marcha (juntas falsas) así como en la operación ( conexiones oxidadas o flojas ). Todos estos problemas implican tiempo y conllevan la parada de la planta. Con las conexiones bus, todo se minimiza.

El termino genérico usado para describir la emergente comunicación digital estándar es *Field bus* (bus de campo) y esta claro que este esta disponible si se permite arreglar las necesidades de un transmisor de campo y mucho más. Si necesitamos un protocolo digital-total; donde no pueden ser señales analógicas, y todos los aparatos en el circuito pueden ser digitales. Si permite esa flexibilidad, y proporciona un medio para la extracción de información para más aparatos de campo inteligentes.

El sistema de conexión digital hace innecesarias las tarjetas analógicas. De este modo no sólo se ahorran en las propias tarjetas analógicas sino también en las salas de distribución y control.

Los ejemplos demuestran que la sustitución de conexiones de un sistema analógico por un sistema digital es justificable dado que se obtienen más de una docena de parámetros de medida. Sin mencionar las ventajas de una puesta en marcha rápida y la creciente transparencia de la planta.

Si se utilizan instrumentos con salida de conmutación local, no hay necesidad de instalar un cableado de control desde el sistema a los actuadores. Esto significa que el sistema puede controlarse de modo descentralizado y que al utilizar un sistema de comunicación bidireccional el control recibe constante información sobre el estado del proceso.

El usuario se beneficia de mayores ventajas económicas gracias a la mayor transparencia de la instalación:

- En cualquier momento tiene total acceso al control de los datos del transmisor. Se indica el mantenimiento a realizar ( por ejemplo, adherencia en el sensor ) pudiendo realizar antes de que se de una parada inesperada de la planta.



- Mediante información detallada pueden tomarse medidas preventivas.
- La tecnología de medición de campo se realiza mediante un sistema de control límite integral y en caso de error desconecta las bombas ( por ejemplo, rebase del depósito).
- El diseño, el cual toma en cuenta la seguridad, es también efectivo si la propia unidad de control falla. Si la instalación de amplia se puede incorporar un punto de medida en la conexión bus existente o bien la arquitectura puede ampliarse simplemente con otra conexión bus. Y no se requiere conexión adicional en el sistema de campo. Los nuevos componentes se registran simplemente en el *software*.
- El control de proceso se realiza utilizando una PLC. Las tarjetas analógicas pueden obviarse dado que una unidad Profibus puede leer todos los valores. Si se incluyen transmisores sin conexión directa a Profibus, entonces se encuentran conectados de modo descentralizado al nivel del transmisor de medida. Las tarjetas de entrada analógica o digitales dan el valor de corriente al bus vía la conexión bus existente.
- Así mismo se han dado adelantos en cuanto a la visualización de proceso. Por medio de un sistema SCADA (Supervisory Control and Data acquisition) la visualización no se da en el PLC sino que accede a la fuente de datos en el propio proceso de medida. El PLC, por consiguiente, no se emplea únicamente para proporcionar datos sino que puede hacer las veces de control de proceso. Bajo ciertas condiciones puede emplearse un modelo inferior. En caso de integrar nuevos puntos de medida o datos adicionales en el proceso de visualización, no afecta el programa PLC. La visualización también emplea estándares comerciales de *hardware* para PC, lo cual es más económico y flexible que el empleado en sistemas PLC. Al emplear el Profibus como un fielbus, los procesos de visualización pueden distribuirse sobre una área mucha más amplia de modo que el jefe de compras y el técnico de planta tengan acceso a la misma pantalla de visualización.
- Por motivos de mantenimiento, se encuentra disponible otra estación PC para el departamento de servicio para observar los procedimientos de proceso de tecnología de medición.



## **CAPITULO 4. SISTEMAS DE CONTROL DISTRIBUIDO.**

Los sistemas de control distribuido (Distributed Control Systems DCS) fueron el resultado exitoso de la conjunción de las evoluciones del control automático analógico y de las técnicas de procesamiento digital.

En el año de 1971, el primer microprocesador fue introducido en el mercado. A partir de ese momento se tuvo a disposición en pequeñas pastillas la capacidad de procesamiento de las grandes computadoras. Fue el corolario de la integración de circuitos que se habían iniciado en los años anteriores.

La aparición del microprocesador hizo posible la aplicación del procesamiento en forma digital de los algoritmos de control, con información desde el campo de los transmisores y acción inmediata sobre los elementos finales de control, que había fracasado en el uso de las grandes computadoras.

La rápida aceptación de este tipo de sistemas a partir de mediados de los 70's se basó en la seguridad y simplicidad de operación y mantenimiento, asociados a un costo competitivo con las soluciones alternativas existentes ( control neumático o electrónico analógico ).



Otras ventajas fueron:

- Mayor capacidad de procesamiento: posibilidad de implementación de control mas poderosos y complejos a bajo costo.
- Flexibilidad para realizar cambios, nuevas implementaciones y pruebas.
- Ahorros importantes en cableado y tamaño de sala de control.
- Mayor disponibilidad de información.
- Mejoras operativas: menos paradas imprevistas y con menor duración, mejores interfaces con el operador, mayor facilidad en los arranques y paradas de las plantas.

Hasta mediados de los 70's la única posibilidad de procesamiento digital de variables analógicas era a través de computadoras que intercambiaban información por medio de conversores analógicos/digitales. Este tipo de control "*centralizado*" tenía dificultades ya que una falla de las computadoras abarca una área importante de la planta ( sino toda ).

La implementación de la redundancia para asegurar la continuidad operativa es cara ( otra computadora ) y compleja, las dos máquinas debían poseer en todo momento la misma información de todas las variables, valores deseados, parámetros de control, salidas, etc.

Además debía preverse un mecanismo altamente confiable que conmutara de una máquina que fallaba, a la que estaba en espera; sin introducir perturbaciones en el proceso. Todas estas dificultades no pudieron ser resueltas en forma confiables y económica por lo que el control por computadora quedo limitado al "control de valores deseados" (set point control, SPC).

La aparición del microprocesador permitió distribuir la "inteligencia". El tratamiento de las variables estaba distribuido entre distintos procesadores, lo que limitaba la consecuencia de una falla a una parte del proceso.

Por otra parte una buen diseño de la ingeniería de aplicación específica y un grado de redundancia importante y relativamente sencilla en procesadores y buses, aseguraron la continuidad operativa de las plantas en donde se aplicó el DCS.





El concepto de redundancia aplicado a este tema significa que existe un par de elementos iguales uno activo y otro en espera. Ante la falla del que esta activo, se transfiere toda la operación que estaba realizando la otra unidad gemela, sin alteración en el funcionamiento del conjunto del sistema.

Otro concepto que se utiliza es el de la tolerancia a falla, donde dos o mas unidades gemelas están ejecutando las mismas tareas. Ante la falla de una de las unidades, ésta se inhibe continuando la otra con el funcionamiento normal de lo que se estaba realizando. El sistema continua funcionando sin alteraciones.

En los dos casos existe un administrador del "estado de salud" del sistema, que indica si se ha producido una falla, informándose a los operadores a través de las estaciones de operación y de las impresoras.

La distribución también se puede ver desde otro punto de vista: *Distribución funcional* ( en subsistemas ); sistemas de interfase con el operador, subsistemas de procesamiento de los algoritmos de control (procesadores de control), subsistemas de conversión analógico/digital, etc. *Distribución geográfica*; la interfase al operador puede estar en la sala de control, los procesadores de control en una sala auxiliar cercana y los módulos de entrada/salida cerca del proceso (por ejemplo a varios cientos de metros de distancia de la sala de control).

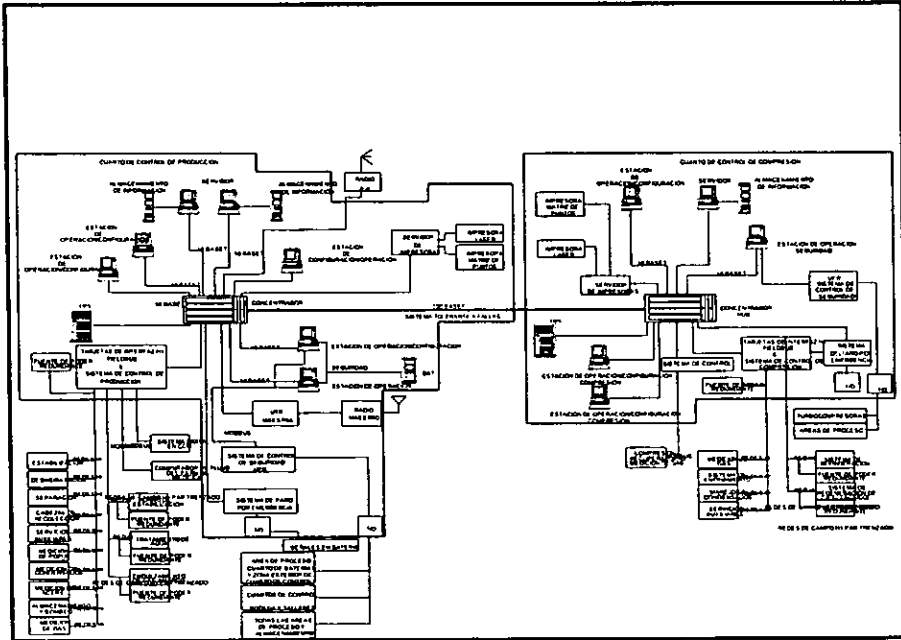


Figura 4.1. Esquema tipico de control distribuido

El sistema de control distribuido es una red de algunas computadoras y equipos periféricos auxiliares. Estos son interconectados para permitir que las señales y datos de los instrumentos pueden ser llevados en la trayectoria de comunicación. Esto es básicamente el concepto de sistemas de control distribuido por ser en si una distribución funcionalmente como oposición a una computadora de control central.

Los sistemas de control distribuido ofrecen soluciones nuevas a problemas antiguos: son fiables, seguros y simplifican la instalación, puesta en marcha y mantenimiento, mejoran la intercomunicación del operador y el proceso, disminuyen el costo del cableado.



En sistemas distribuidos se tienen microprocesadores con los que se pueden separar las funciones en módulos distintos, repartiendo la inteligencia entre varios procesadores de la información intercomunicados entre sí. Cualquier tarea que pueda ser dividida en funciones semindependientes es adecuada para esta estructura.

Las aplicaciones van desde sistemas de procesado de datos de oficina, a los sistemas de control distribuido. En este campo se produce una simbiosis entre procesado electrónico de la información y telecomunicaciones, ya que las señales pueden ser multiplexadas y transmitidas por un procesador codificándolas según un determinado protocolo, y otro procesador puede recibirlas decodificándolas y usándolas para las funciones propias que tenga encomendada.

**SISTEMAS DIGITALES DE CONTROL DISTRIBUIDO.** Un sistema digital de control distribuido esta constituido por un conjunto de procesadores (máquinas digitales de tratamiento de la información) que interaccionan entre sí a través de vías de telecomunicación. Generalmente cada uno de los procesadores está dedicado a funciones definidas y pueden ser configurado (o programado) de acuerdo con las necesidades concretas de cada aplicación particular.

Aunque los sistemas de control digital distribuido parecen implicar que el tamaño de la planta ha de ser grande para su eventual aplicación, debe puntualizarse que ésta es una apreciación incorrecta.

También las plantas pequeñas con fondos limitados y escasos de recursos técnicos pueden verse beneficiadas; las razones principales son la flexibilidad de este sistema para ser ampliados a medida que crecen las necesidades, a partir por ejemplo de doce lazos iniciales, y el poder ser configurados y reconfigurados cuando y como se desee, si cambian las necesidades del control de proceso, así como por sus posibilidades de control secuencial y también por su fácil manejo y forma de presentar la información.

**ARQUITECTURA DE SISTEMAS DE CONTROL DISTRIBUIDO.** Los sistemas de control distribuido se basan en una de las configuraciones básicas siguientes: de estrella, con derivaciones múltiples, en anillo, de red, o en algunas de sus combinaciones.



La combinación de *estrella* tiene el procesador de control de líneas de comunicación en el centro y los procesadores distribuidos o satélites están unidos al de control con una vía de comunicación privada para cada uno. La velocidad de comunicación y protocolo de comunicación de cada procesador con el de control pueden ser distintos, ya que depende de la especificación de entrada/salida de cada puerta de acceso del procesador de control.

Esta configuración es típica cuando el procesador de línea es precisamente un ordenador central que recoge, manipula, integra y presenta con una visualización adecuada los datos que recoge de los procesadores satélites. Este es el tipo de arquitectura del sistema Foxboro a base de ordenador Fox-3 y Controladores 99SC's.

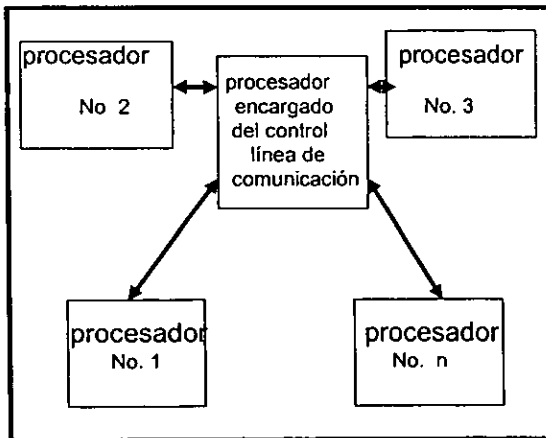


Fig. 4.2. Configuración estrella.

La configuración *con derivaciones múltiples* utiliza una vía de comunicación que interconecta todos los procesadores distribuidos con el de control. En la mayoría de estos sistemas sólo un procesador está transmitiendo en un momento dado, lo que significa que la vía de



comunicación es accesible por todos los procesadores sobre la base de una multiplexión de división de tiempo, es decir, el tiempo total disponible se reparte entre el número de procesadores satélites que haya para que cada uno pueda transmitir sus datos bajo demanda del procesador de control de línea, como en el caso del sistema INTERSPEC, o a petición de alguno de los procesadores satélite, como ocurre en los sistema SPECTRUM, cuya estructura es una combinación de la de derivaciones múltiples y de estrella.

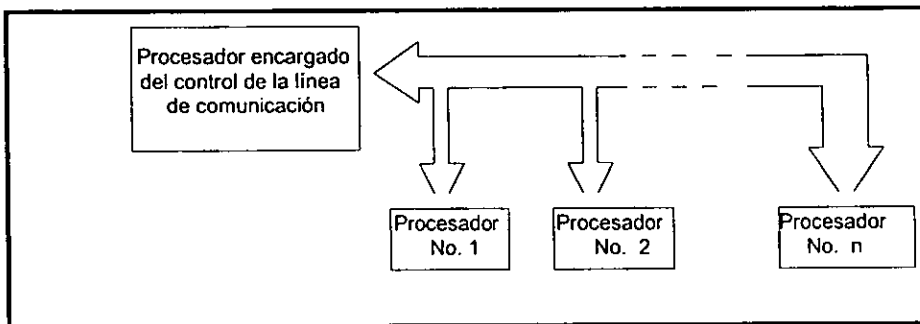


Fig. 4.2. Configuración con derivación múltiple.

Tanto de la configuración en estrella como con la de derivaciones múltiples, si el procesador de control de línea falla desaparece la intercomunicación entre los procesadores satélite y el sistema como tal. Lo mismo ocurre en la configuración con derivaciones múltiples si se rompe el cable que constituye la vía de comunicación.

La fiabilidad del sistema aumenta mucho haciendo redundantes el procesador de control de línea y la vía de comunicación; en este aspecto hay diferencias importantes entre sistemas distintos, como se muestra en la tabla 1:

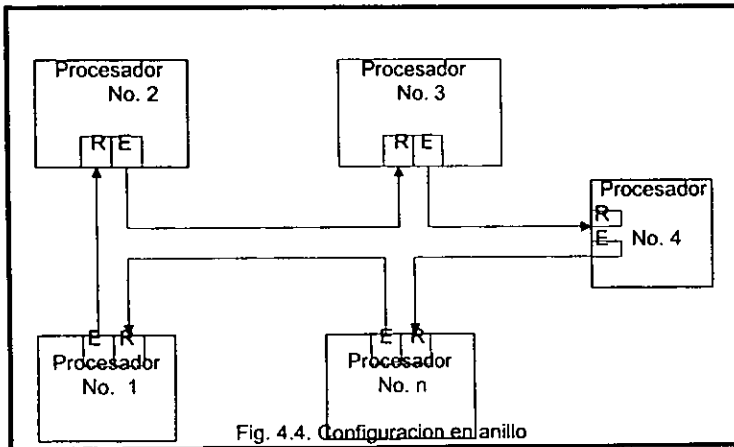


Opciones de redundancia de comunicación de 3 sistemas Foxboro

	99SC's	INTERSPEC	SPECTRUM
No. de procesadores de control en línea posibles	1	2	4
No. de vias de comunicación posibles para cada satélite	1	2	4

En la configuración de *anillo*, los procesadores se conectan en serie. Los mensajes son recibidos y retransmitidos por cada uno de los procesadores hasta que llegan nuevamente al procesador que los origino; esta necesaria repetición hace disminuir la velocidad efectiva de transmisión.

Estos sistemas también admiten vias de comunicación redundantes que en este caso resultan fundamentales puesto que un fallo de cualquiera de los  $n$  repetidores (uno de cada procesador) puede dejar fuera de servicio el sistema de comunicación.





La configuración en *red* es la más general y flexible, y también la más costosa. El fallo de cualquier vía de comunicación no afecta el sistema por haber caminos alternativos. En este caso todos los procesadores suelen ser equipos de computo, con autonomía propia, y deben tener un protocolo de comunicación común. El fallo de cualquiera de los procesadores tampoco afecta el funcionamiento del resto.

Un inconveniente del sistema es que suele exigir unidades intermedias repetidoras para recibir y retransmitir los mensajes (como ocurría en la configuración de anillo) y la velocidad efectiva de transmisión será menor

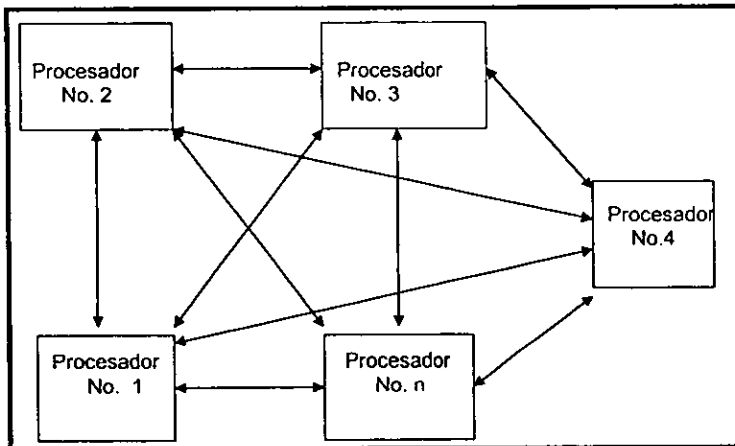


Fig. 4.5. Configuración de red.

**MODULOS FUNCIONALES EN SISTEMAS DE CONTROL DISTRIBUIDO.** Cada una de las unidades que forman un sistema de control distribuido está pensada para que cumpla una función definida dentro de una jerarquía de valores claramente establecidos en cada sistema. Con carácter general se puede hablar de las siguientes categorías de equipo:

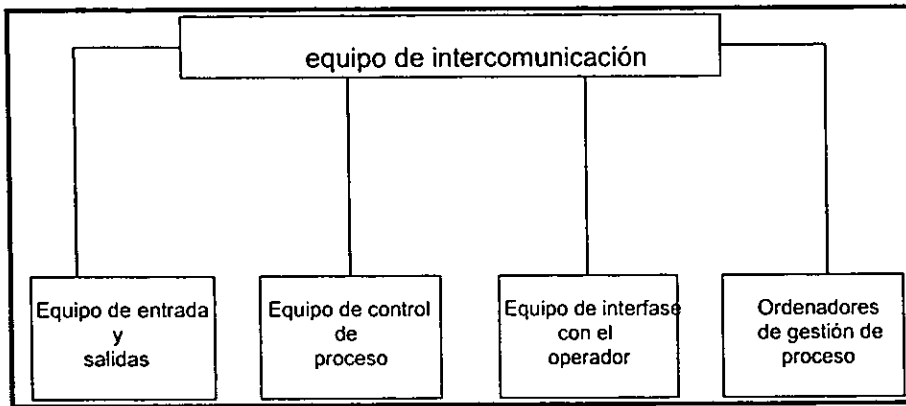


Fig. 4.6. Módulos funcionales en un sistema de control distribuido.

- *Equipo de entradas y salidas*, que ha de permitir el acceso y la recogida de datos (entrada del proceso), y la ejecución de la orden de mando del sistema ( salidas hacia el proceso).

El subsistema necesario para hacer la adquisición de datos de variables del proceso de una multitud de puntos cuyos parámetros interesa conocer, pero no regular, tanto de señales analógicas como de contactos, y eventualmente para permitir generar órdenes de mando de salida hacia el proceso, es la unidad funcional que se denomina de "entrada y salidas".

Este equipo permitirá al sistema conocer el valor de temperaturas, caudales, niveles, resultados de análisis, etc., estados de apertura y cierre de contactos, reostatos, flujostratos, estado de marcha/paro de motores, etc.

Esta función generalmente se consigue con una familia de tarjetas, cada una de las cuales es capaz de manejar un cierto número de señales de entrada o de salida del mismo tipo y variable.





Las señales de entrada, tanto analógicas como digitales deben ser exploradas como mínimo cada 2 segundos. El procesador digital de las señales analógicas de entrada y salida es conveniente que se haga con una resolución de 12 bits, lo que equivale a poder discriminar 1 entre 4000, para evitar la introducción de errores adicionales teniendo en cuenta que los transmisores de la última generación trabajan con precisión de 0.2 por 100, es decir, 2 sobre 1000, y repetibilidades y zonas muertas mucho menores.

El rechazo a las interferencias de modo común de las tarjetas de entrada debe ser mayor que 120 dB a 250V y 50Hz, las interferencias de radiofrecuencias (típicas de los Walkie-Talkies), deben producir variaciones de las señales inferiores al 1 por 100 con una intensidad de campo de 3 V/m (SAMA Clase 1) dentro de la gama desde 27 a 500 Mhz, y las interferencias electromagnéticas con intensidad de 20 Gauss y 50 Hz deben producir un error inferior al 0.1 por 100.

La lista de tarjetas de entrada/salida debe abarcar las señales que se encuentran en transmisores, sensores y elementos finales de control, por ejemplo, entre las señales de entrada: 4-20 mA y 10-50 mA cc, 0-10 V cc, termopares, detectores de temperatura por resistencia eléctrica, frecuencia de impulsos, señales en BCD, es decir, en dígito decimal codificado binariamente, y señales de estado lógico de contactos en ca, cc y de contactos sin tensión; y entre las señales de salida debe disponerse de 4-20 mA y 10-50 mA cc, 0-10 V cc, de duración de impulsos, y de contacto sostenido o de un solo impulso, tanto para cc como para ca.

Conviene que estos sistemas provean la linearización de las señales de entrada no lineales, y dispongan de compensación de la temperatura de la unión de referencia, si se usan termopares. También son preferibles los que tienen entrada diferencial y flotante por doble terminal, a los de una sola terminal y otro común, porque los primeros tienen un gran rechazo a las interferencias de modo común.

Los subsistemas de entrada/salida en las versiones de convertidores analógico/digital y digital/analógico compartido e individual. Cuando son compartidos, un fallo en el mismo deja fuera de servicio toda la unidad y por lo tanto se pierden las n señales que manejen. En el caso de unidades de salida, los amplificadores operacionales de mantenimiento pueden producir derivas en la salida si se tarda un tiempo considerable entre actualizaciones



sucesivas de la señal; por el contrario, los registros digitales usados con los convertidores digital/analógico individuales trabajan con deriva nula.

- *Equipos de control de procesos*, que ha de disponer de la interfase adecuada para manejar las señales de entrada y salida encontradas normalmente en el campo del control de procesos, y del hardware y software necesarios para ejecutar dicho control.

Conviene distinguir, en primer lugar, entre los subsistemas que usan controladores configurables compartidos entre varios lazos, y los que siguen utilizando reguladores individuales por lazo.

Controladores configurables compartidos. El controlador primario de este tipo de sistemas suele ser procesador digital compartido por varios lazos de control, cuya interfase con el proceso se realiza con un conjunto de módulos para manejar las entradas y salidas del proceso que se necesitan para implementar la estructura de control que se desee; la estrategia del sistema de regulación se construye a partir de un juego de algoritmos, o procesamientos de cálculo que pueden ser interconectados por el usuario configurándolos de acuerdo con el esquema de control adecuado a su aplicación concreta.

El diseño de hardware ha de ser adecuado al ambiente industrial en el que va a trabajar, y debe concederse importancia a cómo se ha diseñado la seguridad del sistema, desde el punto de vista de la alimentación eléctrica, de la redundancia disponible en el caso del procesador principal de la posibilidad de acceso al mismo por más de una puerta, de la posibilidad de lectura y gobierno del proceso en caso de emergencia, de las características de fallo seguro en las interfaces de salida, de su autoverificación y autodiagnóstico.

La problemática de los sistemas a base de reguladores individuales es distinta a la de los controladores compartidos; en los primeros, un fallo normalmente afecta a un lazo, mientras que en los segundos puede afectar a todos los implementados en el controlador. Por esa razón, en el caso de reguladores individuales no se contempla tan seriamente el aspecto redundancia del controlador, pero sí de la alimentación (suelen montarse fuentes en paralelo) y la de acceso a la vía de datos (suele disponerse de dos puertas de acceso independientes).



- *Equipo de interfase con el operador*, que ha de consistir en unidades múltiples de visualización basadas en tubos de rayos catódicos (CRT's) - es decir, pantallas de televisión -, con los correspondientes teclados, para que el operador pueda actuar sobre el proceso, y de otros dispositivos auxiliares que necesite el operador para monitorizar y gobernar el proceso.

Este equipo debe permitir al operador realizar las funciones que tradicionalmente ha venido haciendo frente a un panel convencional de instrumentos; para ello debe contar con la posibilidad de indicación de variables para monitorizar el proceso; el registro de las magnitudes que interesen para poder analizar fenómenos transitorios, tendencias, y como almacén de datos históricos; las funciones propias de la regulación tales como cambiar puntos de consigna, variar factores de estaciones de razón, conmutar de puntos de consigna local al remoto, y/o automático a manual, o viceversa, y ajustar los parámetros de sintonizado de reguladores; el mando de motores mediante pulsaciones de arranque-paro y reconocimiento del estado en el que esta cada motor; la reacción ante alarmas que se notifican mediante centelleo y con distinción del estado de acuse de recibo; la visualización del proceso mediante representaciones gráficas del mismo. Además de obtener informes escritos de producción, de alarma, de verificación de errores del sistema y de diagnósticos.

- *Ordenadores de gestión de proceso*, que ha de proveer el control supervisorio del proceso, la generación de informes, la optimización a nivel de unidades y de la planta, y otras funciones de gestión de plantas de proceso.

La gestión de proceso es el arte y ciencia de la planificación de operaciones y de la toma de decisiones. Una herramienta fundamental para esta planificación y actuación, la constituyen los ordenadores de proceso, que recogen en tiempo real una gran cantidad de datos, los almacenan, correlacionan los de varias plantas del mismo complejo, eligen los que se necesiten para realizar tareas específicas, los utilizan en programas, procedimientos de actuación y en modelos matemáticos para calcular interacciones, tendencias, posibilidades, etc., y presentan los resultados como se necesiten en forma de visualizaciones en pantalla e informes escritos sobre producción, costo, rendimiento y beneficios, fáciles de entender y cómodos de utilizar.



Estos ordenadores tienen acceso a toda la información del proceso a través de la vía de datos del sistema de control distribuido, y pueden supervisar el funcionamiento de una o más unidades, de sus reguladores y del propio sistema.

- *Equipo de intercomunicación*, que interconecta todos los subsistemas mencionados como módulos funcionales del sistema distribuido, y permite el intercambio de información entre los mismos.

El sistema de comunicación proporciona un libre flujo de información entre los diversos módulos funcionales del sistema de control distribuido, a una alta velocidad, controlando y ordenando el tráfico a través del mismo, asegurando la integridad de los datos mediante una adecuada técnica de detección de errores, y dando oportunidad a los módulos que integran el sistema para emitir mensajes y responder a las preguntas que hagan otros.

En los sistemas con una sola estación principal (Master) y varios módulos esclavos, sólo puede hacer preguntas una estación, la principal, y los esclavos se limitan a responder; el sistema de comunicación necesario es, relativamente hablando, más sencillo que cuando hay dos estaciones principales, y mucho más cuando se trata de sistemas multi-master en los que el número de módulos que pueden iniciar preguntas es mayor.

Otra diferencia entre estos sistemas es la necesidad o no de disponer de un controlador de comunicación para adjudicar la vía de datos cada vez que un módulo quiera comunicarse con otro; el rendimiento de la comunicación será mayor cuando dicho controlador no existe y los módulos se pueden comunicar directamente.

Los protocolos de comunicación de longitud fija permiten la transmisión de un número concreto de datos una vez establecida la comunicación, si se quiere transmitir un número mayor hay que cortar la comunicación y volverla a establecer (con la consiguiente pérdida de tiempo) para transmitir un nuevo grupo de datos.

Los protocolos de comunicación de longitud variable son mucho más flexibles y potentes, puesto que permiten transmitir cualquier número de



datos entre uno y el límite superior que se decida hasta un máximo prefijado que, en el control de procesos, se sitúa por encima de 6 000 datos de 16 bits cada uno en un tiempo del orden de 100 milisegundos.

Otra característica es la circulación de datos sólo en una dirección (denominada simplex), o la circulación de datos en cualquiera de las dos direcciones, pero no simultánea (denominada half-duplex), o si los datos pueden circular en ambas direcciones al mismo tiempo (comunicación full-duplex).

Se indican algunas recomendaciones prácticas para tener en cuenta en DCS (que pueden ser válidas para PLC y OIS):

- Ingresar las señales que de alguna manera se encuentran vinculadas por proceso en distintas tarjetas de entrada/salida (por ejemplo caudal de vapor a un intercambiador de temperatura de salida del producto de dicho intercambiador, si se pierde una de las señales se podrá observar cómo se comporta la otra).
- Tener reserva del 20 % en la capacidad de procesamiento (siempre se van a encontrar nuevas estrategias a implementar).
- Tener reserva instalada del 20 % en entrada/salidas y/o reserva en espacio para instalar nuevas tarjetas de entrada/salida o procesadores del 30 % total para futuras expansiones. Si no se toma esta previsión agregar una tarjeta más puede implicar agregar otro gabinete con su correspondiente fuente, redundancias de comunicación, etc.
- Por razones de seguridad redundar comunicaciones, procesadores y aquellos elementos que manejan aspectos críticos del sistema (no redundancia en exceso ya que los gastos pueden ser importantes y no siempre se justifican).
- Asegurar la alimentación eléctrica a los DCS ya sea a través de doble alimentación que no falle simultáneamente, o a través de UPS con suficiente respaldo de baterías que en caso de corte de la alimentación eléctrica, garantice la continuidad operativa o un paro controlado de planta.
- Instalar los sistemas en lugares accesibles y acondicionados a las especificaciones del proveedor.
- Proveer a los operadores y usuarios de una iluminación adecuada y de las comodidades para las tareas a desarrollar (las impresoras suelen ser muy ruidosas por lo que es conveniente colocarlas alejadas de las estaciones de operación).



Después de conocer los motivos que hicieron que los DCS (aparecido alrededor del año de 1975) tuvieran una penetración tan importante en el área de control analógico, al resolver los problemas que se habían presentado hasta entonces con el control por computadora (sistemas centralizados desde los 60's).

El concepto de distribución se universalizó con posterioridad (PLC, Sistemas basados en PC, Sistemas SCADA, etc.) pero el nombre de DCS se reservó a los sistemas de procesamiento de origen analógico, que fueron los primeros en utilizarlo. Algunos de los ejemplos de DCS son: TDC3000 (Honeywell), MOD3000 (ABB), Spectrum (Foxboro), INFI 90 (Bailey), Provox (Fisher), Centrum (Yokogawa).

Los DCS fueron un paso clave para el sistema de control digital y sentaron las bases del manejo de datos en forma masiva en tiempo real, abriendo las puertas para la nueva generación de sistemas digitales: los Sistemas Industriales Abiertos.



## **CAPITULO 5.                    SISTEMAS     SCADA .**

El nombre SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition, Control Supervisor y Adquisición de Datos) se aplica a sistemas de control en los que el proceso está disperso en una amplia superficie geográfica: cubriendo desde algunas decenas de kilómetros hasta subcontinentes enteros, cruzando varios países. Los sistemas SCADA se utilizan en el control de oleoductos, sistemas de transmisión de energía eléctrica, yacimientos de gas y petróleo, redes de distribución de gas natural, subterráneos, etc.

Un SCADA consta de 3 partes fundamentales:

- 1.- Las unidades terminales remotas, o Remote Terminal Unit (RTU): reciben las señales de los sensores de campo, y comandan los elementos finales de control. Un sistema SCADA puede tener decenas de RTUs, distribuidas en una amplia superficie geográfica. En forma periódica son interrogadas por la Estación Maestra. Puede tener capacidad de control o no.
- 2.- La Estación Maestra o Master Terminal Unit (MTU): se trata de un conjunto de equipos que cumplen con las siguientes funciones:



- Interrogan en forma periodica a las RTUs, y les transmiten consignas; siguiendo usualmente un esquema maestro-esclavo.
- Actua como interfase al operador, incluyendo la presentación de información de variables en tiempo real, la administración de alarmas, y la recolección de información historizada.
- Puede ejecutar software especializado, que cumple funciones específicas asociadas al proceso supervisado por el SCADA. Por ejemplo, software para detección de pérdidas en un poliducto.

En sistemas relativamente sencillos, estas funciones pueden estar concentradas en un único equipo, como una PC. En sistemas de mayor complejidad, se puede utilizar una minicomputadora para resolver las comunicaciones con las RTUs, y ejecutar el software de aplicación. En este caso se pueden utilizar terminales o PCs como interfase al operador.

3.- El Sistema de Comunicaciones: enlaza la Estación Maestra con las RTU. La comunicación se puede establecer por distintos medios físicos (microondas, radios, par telefonico, etc.).

Una característica de los sistemas SCADA es que sus componentes son diseñados por distintos proveedores, sin coordinación entre si. Así, se tienen diferentes proveedores de los RTUs (incluso es posible que un sistema utilice RTUs de más de un proveedor), modems, radios, minicomputadoras, software de supervisión e interfase con el operador, software de detección de pérdida, etc.

Puesto que el diseño de estos componentes no es coordinado por un único proveedor, su distinta velocidad de evolución tecnológica puede generar incompatibilidades. Por lo tanto es importante que los distintos proveedores adquieran normas de facto o de jure.

*UNIDAD TERMINAL REMOTA (RTU).* Las funciones básicas de las RTUs son la recolección de la información suministrada por los sensores conectados al proceso, el comando de elementos finales de control que actúan sobre el mismo (tales como válvulas y motores), y la comunicación con la Estación Maestra.





En los primeros sistemas SCADA (alrededor de los años 70's) las RTUs solo aceptaban un reducido numero de funciones prefijadas. La introducción de los microprocesadores en un diseño significó una nueva generación de RTUs, con mayor inteligencia local, capacidad y funcionalidad. En resumen los RTUs deben cumplir con las siguientes funciones:

- Actualizar el valor de la entradas y salidas a intervalos prefijados. El proceso de actualización se realiza en un ciclo de barrido o scan. Consiste en leer la información de las señales de entrada, digitalizarlas, procesar (por ejemplo, linealizarlas), y volcarla a la memoria de la RTU. Inversamente la información de la memoria será volcada a la salida de la RTU.
- Responder a los requerimientos de la Estación Maestra. Por ejemplo, la Estación Maestra puede enviar un mensaje solicitando se le informe el estado de las entradas, a lo que el RTU responde con un mensaje que contiene esta información.
- Detectar estados de alarma de procesos, y acumularlos en la memoria para reportarlos a la Estación Maestra cuando le sean solicitados.

Algunas funciones adicionales que pueden estar disponibles son:

- Capacidad de control regulatorio, secuencial y lógico.
- Capacidad de cálculo local, por ejemplo, compensación de caudal de gas por presión y temperatura según la norma AGAS. En este caso, la RTU podría reportar el caudal de gas compensado por presión y temperatura en lugar de reportar la presión diferencial, la presión manométrica y la temperatura. Se disminuye así la carga de la Estación Maestra y el tráfico en el sistema de comunicaciones.
- Posibilidad de tomar acciones definidas en caso de falla de las comunicaciones.

*ESTACION MAESTRA.* La estación maestra tiene como funciones:

- Obtener la información requerida de las RTU por medio de un proceso de encuesta o "polling".
- Procesar esta información, actualizando la base de datos de control, y generando las alarmas que correspondan.



- Historizar a las variables de la base de datos de control.
- Presentar esta información al operador, bajo la forma de pantallas generales (overview), mímicos, resumen de alarmas, gráficos de tendencia y reportes.
- En algunos casos, correr programas de aplicación especiales.

Típicamente, la Estación Maestra en una computadora de propósito general con un sistema operativo multitarea, sobre el que se ejecutan programas de diversos tipos. El software básico debe comprender las siguientes funciones:

1. Subsistemas de comunicaciones, responsables de comunicarse con las RTUs. Incluye estadísticas implementadas por medio de contadores que indican la cantidad de fallas de distintos tipos ocurridas (mensajes de los que no se recibió respuesta, mensajes que fueron mal recibidos, etc.).
2. Subsistema de administración de la base de datos, que ejecutan aquellas estrategias de control residentes en la Estación Maestra.
3. Subsistema de administración de alarmas.
4. Subsistema de interfase al operador.

Por otra parte el sistema requiere de funciones adicionales:

- \* Historización de variables.
- \* Validación de datos.
- \* Detección de pérdidas ( por ejemplo en un oleoducto o gaosducto ).

En función de estos requerimientos, se desprenden las características del software y del hardware sobre el que se debe correr. En términos generales, las características del software son similares a las que se basan los sistemas operativos tales como UNIX, QNX, VMS, etc. Desde el punto de vista del hardware, la Estación Maestra puede estar conformada por uno o varios equipos:

- Computadoras personales PC: se utilizan en sistemas de pequeña magnitud, debido a su limitada capacidad de procesamiento. En este caso, el software arriba listado corre en esta única PC, que actúa también como interfase al operador.
- Red de computadoras personales PC: en este caso, se distribuyen las funciones de interfase al operador, historización y ejecución de software de aplicación en varias PCs, que están conectadas en una red La.



También puede distribuirse la función de comunicación con las RTUs. En este caso, cada PC interroga un grupo de RTUs.

- Estacion de trabajo (Workstations): se trata de una configuración similar a la de una PC o una red de PCs, solo que una o varias PCs son reemplazadas por workstations. La *workstations* es una computadora de propósito general, usualmente dedicada a un único usuario, da capacidad mayor a la de un IBM PC compatible, pero inferior a la de una microcomputadora. Incluye monitoreo de alta resolución, memorias RAM de al menos 16 Mb y discos rígidos de al menos 400 Mb. Son utilizados en aplicaciones que requieren capacidad de cálculo intenso y presentación gráfica de alta resolución, como el Diseño Asistido por Computadora, desarrollo de Software, etc. Este tipo de computadoras es requerido en sistemas donde se corra software de aplicación de cálculo intensivo, como la detección de perdidas.

Minicomputadoras: son computadoras de alta capacidad, que soportan múltiples usuarios a través de terminales conectadas en red. Una minicomputadora puede soportar desde 10 hasta 200 usuarios. Son utilizadas en algunas aplicaciones en donde se requieren de una capacidad de cálculo extremadamente alta, y administración de información.

Tradicionalmente un sistema SCADA se limito a ser una herramienta para el soporte de decisiones relacionadas a la operación del proceso, por ejemplo, el control de un gasoducto. Actualmente puede integrar funciones administrativas como por ejemplo:

- Programación de los envíos de distintos clientes de la compañía de transportes por cañería.
- Facturación del servicio de transporte de fluido. Dentro de este caso se puede mencionar la facturación de transporte de energía eléctrica, en los sistemas de despacho de energía.

En estos casos, las funciones administrativas pueden influir en forma importante en la definición de la arquitectura de la Estación Maestra.

**SISTEMA DE COMUNICACIONES.** La columna vertebral de un sistema SCADA en su sistema de comunicaciones. Este es un recurso esencial, que debe ser muy confiable. El sistema de comunicación vincula a las RTUs con la



Estación Maestra, se puede utilizar una variedad de medios de comunicación, incluyendo:

- Línea dedicada
- Línea telefónica
- Fibra óptica
- Telefonía celular
- Radio VHF (Very High Frequency)
- Radio UHF (Ultra High Frequency)
- Microonda
- Comunicación satelital

La selección del sistema de comunicación depende de varios factores: distancias involucradas, tipos de terrenos (llanuras, montañas, etc.), velocidad de comunicación requeridas y costo. La disponibilidad de infraestructura de comunicaciones existente puede ser un factor determinante en la selección.

Desde este punto de vista es interesante mencionar que los sistemas SCADA aplicados a Sistemas de transporte de energía eléctrica utilizan las mismas líneas de alta tensión como medio físico, superponiendo señales de comunicación a la energía eléctrica transportada, por medio de la tecnología FSK (Frequency Shift Key). Las velocidades típicas varían entre los 600 a 2400 bit/s, dependiendo de las dificultades que se produzcan en la transmisión. Una característica deseable en el sistema de comunicación es la posibilidad de variar en forma automática la velocidad de transmisión según la dificultad que se tiene para transmitir.

La comunicación de variables de las RTUs a la Estación Maestra es un objetivo básico de los sistemas SCADA.

Por ello es necesario implementar un protocolo de comunicación que sigue usualmente el esquema maestro-esclavo. Un protocolo que se utiliza con bastante frecuencia en los sistemas SCADA es el ModBus. Este protocolo presenta la ventaja de ser un estándar de facto, al cual se adhieren numerosos proveedores. Como contrapartida, no tiene algunas características que son deseables en muchos sistemas, y que se describirán a continuación. Estas características son ofrecidas por diversos proveedores, como parte de sus protocolos propietarios.



# ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

SCADA.

- Reporte de excepción: esta característica hace el buen aprovechamiento del canal de comunicaciones. Una RTU sin esta característica recibe (y responde) mensajes del tipo "transmitir el estado de todas las variables". De este modo, variables cuyo estado no se alteró desde la última consulta son transmitidas a la Estación Maestra. En un reporte por excepción, la consulta toma la forma "transmitir la forma de las variables cuyo estado cambió desde la última consulta". Así se disminuye el tráfico de la red en forma significativa. En el caso de variables discretas, la RTU transmite el valor de aquellas variables que pasaron de 0 a 1, o viceversa. En el caso de variables analógicas, se define una banda tal que, superada la misma, se considera que la variable cambió.
- Recepción y reenvío de mensajes: esta característica es particularmente útil en sistemas de gran longitud, como los oleogasoductos. En esta caso, las RTUs siguen la traza de la cañería y son alimentados por paneles solares. Debido a las grandes distancias cubiertas, y a los obstáculos geográficos generalmente presentes, los mensajes deben ser retransmitidos de RTU en RTU. En un protocolo maestro-esclavo normal, los mensajes son escuchados por todas las RTUs, aunque solo corresponda a aquella RTU a la que va dirigida. Esto significa que los radios del sistema de comunicación repiten el mensaje en todas las estaciones; por lo tanto es necesario dimensionar el sistema de panel solar de manera tal que soporte el consumo de la radio, mientras repite mensajes que no son necesarios, lo cual resulta en paneles más grandes y más costosos. Esto puede evitarse si las RTU tienen la capacidad de reenviar los mensajes en forma selectiva, es decir, reenviado solo aquellos mensajes que no alcanzaron su destino. Se disminuye así el tiempo que están encendidas las radios de las RTUs ( y su consumo promedio).

En algunos casos se utilizan como RTUs equipos que no han sido específicamente diseñados para ese fin, como son los PLCs. Esto es generalmente aceptable, aunque debe presentarse atención a las eventuales limitaciones que surjan de un protocolo de comunicaciones poco apropiados y/o un elevado consumo.

Por otra parte, también existen algunas RTUs diseñadas para una función específica. Tal es el caso de algunas computadoras de caudal de gas, diseñadas específicamente para calcular en forma instantánea el caudal del gas, compensado por la norma AGA3. El consumo de gas es



almacenado en tiempos prefijados ( como por ejemplo cada 5 minutos ). Finalmente, se transmite esta información a la Estación Maestra una vez por día.

El control supervisor tradicional y los sistemas de adquisición de datos tuvieron por un largo tiempo semejanza con el sistema de control digital directo. Los sistemas de adquisición de datos locales y los controladores programables basados en microprocesadores son el resultado del trabajo precursor de todo el sistema SCADA.

Se recordara que veinte años fueron necesarios para la total aceptación de los términos de ganancia y la definición de medición, de ahí que lo mismo haya pasado con el termino de supervisión control y adquisición de datos (SCADA).

Los sistemas SCADA respondieron a los siguientes requerimientos: manejo de datos de forma rápida que mejora la adquisición de datos, conectando así los servicios para la recolección y manipulación de datos de producción en tiempo real obteniéndose de esa manera todas las operaciones y aplicaciones de la planta completa. Entre las labores de control supervisor se incluye el manejo de set-point y la respuesta a las alarmas del proceso.

El sistema SCADA incluye alarmas, almacenamiento de datos, comportamiento del proceso en tiempo real, manejo de disposiciones anteriormente establecidas, reportes escritos, redes de conducción, envío de señales remotas para la automatización total de la planta, monitoreo de variables en tiempo real. De este tipo de técnicas se consiguen aplicaciones que reducen el sistema y el costo de cableado de toda la planta por el envío de información via microondas mejorando el acercamiento de las mediciones y eliminando el tiempo consumido en los procesos de calibración de instrumentos, además del tiempo requerido para la sincronización de los equipos locales con la estación maestra.

Los rasgos del software de los sistemas operados en tiempo real, la capacidad de las redes integradas, clientes remotos y locales, procesamiento de la adquisición de almacenamiento de datos, módulos



lógicos y la capacidad de avisos de información remota requiere de reportes que pueden ser elaborados en Ethernet, Arcnet y alguna serie o red disponible.

En la arquitectura del sistema SCADA se pueden tener transmisores que son conectados a la estación maestra usando el modo de comunicación de multienvío (multidrop) totalmente digital, conectándose por medio de unidades terminales remotas (RTU) desde el sistema de control. La comunicación de la estación maestra con la RTU es realizada a través del uso de una red de cableado o por comunicación vía microondas.

Los datos pueden ser adquiridos desde sitios remotos por una estación maestra vía manejo de designación de controladores lógicos programables (PLC), unidades de terminal remota (RTU) y algunos otros aparatos similares. Esto puede ser realizado a través de un gran arreglo artificial que incluye microseñales, satélites, radios y teléfonos. El aparato final esta encabezando la especificación de la información que sostiene las características donde los datos trabajan esperando su turno para poder pasar al procesador de datos. Todos los datos son almacenados en la memoria.

Con la acumulación de datos de las estaciones remotas, la estación maestra automatiza el control de varios equipos de proceso y proporciona la visión de las áreas de todo el proceso para ayudar en el manejo de las operaciones eficientes.

La disponibilidad de la comunicación de RTU con los transmisores minimiza el costo y ayuda a la simplificación del sistema integrado. Cuando se utiliza el monitoreo con técnicas convencionales semejantes a la comunicación de 4-20 mA es necesario establecer un PLC con cada nodo o cada punto clave en el envío de campo, esto es envío punto a punto que debe cambiar información con la estación maestra implicando esto una gran pérdida de tiempo.

Los RTU permite que los datos digitales puedan ser concentrados y enviados de regreso a una estación maestra según el protocolo establecido. Esto permite el planteamiento de una estrategia de monitoreo distribuido que se acerque más a la calidad deseada del protocolo pero usando menos hardware.



Como se menciono anteriormente, un sistema SCADA consiste de Unidades Terminales Remotas (RTU's), una estación submaestra y una estación maestra. Cada RTU inteligente opera como un subsistema de adquisición de datos de manera independiente para explorar los sensores del proceso, determinar las condiciones de alarma, y realizar el almacenamiento de datos.

Cada RTU también puede soportar un limite regulatorio y de secuencias de control. El modo de control de comunicación recibe las RTU y concentra los datos para transmitir hacia la estación maestra o submaestra.

Se puede tener en lugar de un controlador de flujo de pulso, un generador totalizador de datos localmente para convertir una señal de 4-20 mA, el acercamiento del totalizador de datos digitales es ahora transmitido directamente a la estación maestra vía un lazo en serie.

Adicionalmente la simplificación de los requerimientos de hardware en el nodo de campo y estas aproximaciones digitales evitan los sistemas de integración complejos y costosos semejantes a aquellas que necesitan de la sincronización de totalizadores entre la estación maestra y los PLC de campo. Y es menos susceptible a problemas de resistencia de poder o falla en la red.

Los sensores inteligentes, instrumentos analíticos, y los actuadores usan los datos del proceso y un transmisor que permite la comunicación del sistema vía un dispositivo de estación maestra. El protocolo de comunicación puede ser usado para dos caminos básicos:

- En combinación con las señales de corriente de 4-20 mA (de conocimiento punto a punto) que es llamado al mismo tiempo analógico híbrido o híbrido de 4-20 mA.
- La comunicación con aparatos de campo múltiples en un circuito usando una comunicación totalmente digital conocido como un modo multidrop.





El primer modo retiene la industria estándar de 4-20 mA de señal de control para un aparato de campo simple cuando se proporciona simultáneamente procesos adicionales e instrumentos de datos digitales. La comunicación digital ocurre sobre el mismo circuito analógico con la distribución de señales del proceso que son usadas en el control. Simultáneamente el protocolo tiene que ser usado para acceder una gran variedad de diagnósticos digitales y manejo de información.

El segundo modo permite la conexión en paralelo de aparatos múltiples en un circuito de control, conocido como multidrop, ese modo de trabajo es fuente de aplicaciones de monitoreo remoto semejantes al de tuberías, custodia de la transferencia local y tanques de almacenamiento. La rapidez de la adquisición de los datos en este modo permite la optimización si el circuito es conectado para ajustar al transmisor.

Tradicionalmente los circuitos punto a punto empleaban un cero para el aparato inteligente en la caseta de direcciones. Un circuito multidrop (múltiples envíos) es creado para localizar la dirección del aparato inteligente como un número superior a cero. Esto causa en la unidad el establecimiento de la salida analógica como una constante de 4 mA y la comunicación es solamente digital. Los mecanismos de comunicación usados son llamados de transferencia de frecuencia clave.

Con la resistencia del circuito de 4-20 mA depende si se usara un aparato simple o un modo multidrop. Un modo de aparato simple en la interface es un cableado cruzado del circuito de resistencia con el desarrollo de una labor normal de un convertidor de corriente a voltaje. En un modo multidrop la interface modula la corriente desde un suministro de poder para el transmisor cuando el cableado es paralelo.

Se pensaba que el controlador programable no tenía un efecto mayor en el sistema SCADA debido a que ellos vigilan de una manera más sofisticada que las aplicaciones típicas de RTU requeridas y sus protocolos de comunicación porque sus estándares no son frecuentemente compatibles con el sistema SCADA en necesidades y requerimientos.



El sistema SCADA, sin embargo, esta hecho con una interface de controladores programables como un nivel local de RTU, mientras que el mismo RTU esta incorporado como una función local que puede eliminar las necesidades de controladores programables.

El equipo de controladores programables permite hacer el reemplazo del tradicional RTU si el software de comunicación puede ser cambiado y si la aplicación puede ser justificada por las necesidades de un nivel más alto de comunicación.

Sin embargo los controladores programables y los controladores de proceso son mas fáciles de programar que un RTU inteligente. Puesto que el RTU simplemente recoge datos y envía de regreso a la unidad terminal master (MTU), en cambio un controlador programable puede manejar el control de un motor, realizar algún control analógico, y desarrollar el mismo trabajo que el RTU.

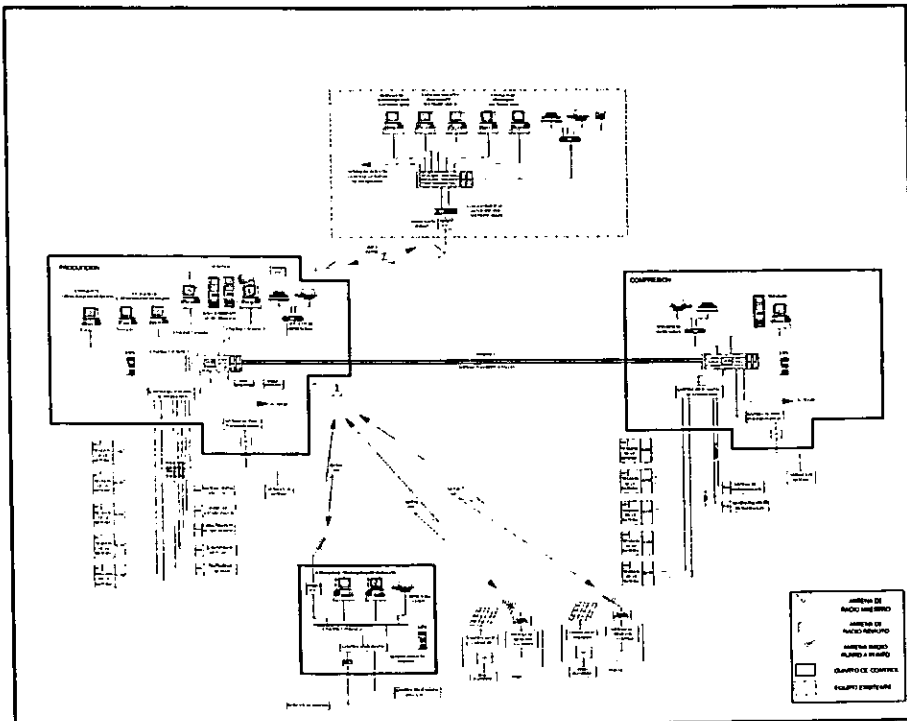


Fig.5.1. Sistema SCADA típico, colecciona datos de unidades de terminales remotas por telemetría sobre grandes distancias para las



unidades terminales master que son supervisadas por una estación maestra.

CLASIFICACION DE SISTEMAS SCADA. Los sistemas SCADA se caracterizan por una gran diversidad, dependiendo del proceso que controlan, la tecnología utilizada, etc. Es así que toda clasificación encuentra abundantes excepciones. A continuación los agrupamientos según su distribución geográfica, ya que los sistemas SCADA comparten ciertas características en común desde este punto de vista.

Sistemas lineales. Se agrupan aquí los sistemas con un desarrollo lineal, tales como:

- Oleoductos
- Gasoductos
- Poliductos
- Acueductos
- Redes de ferrocarriles y subterráneos
- Redes de distribución de energía eléctrica.

Estos sistemas están asociados al transporte de elementos, a lo largo de grandes distancias. Las distancias cubiertas llevan a grandes problemas en el mantenimiento, por lo que una pequeña mejora en el mantenimiento de los equipos utilizados (este asociado al proceso o al SCADA) pueden justificar una importante inversión.

Las RTUs pueden estar asociadas a diferentes equipos: estaciones compresoras, estaciones reguladoras de presión, válvulas de control y bloqueo, estaciones de medición, repetidoras del sistema de comunicación, etc. La diversidad de estos equipos lleva a la coexistencia de RTUs de distintos tamaños, según la complejidad del equipo que supervisa. Cada una de estas aplicaciones presentan diferentes requerimientos:

- En los poliductos es necesario detectar la interfase entre los distintos fluidos transportados, su enrutamiento a distintos tanques.
- En acueductos, oleoductos y poliductos se debe controlar el envío de dispositivos de limpieza denominados scrappers (raspadores, también llamados pig).



- En sistemas ferroviarios, de subterráneos, etc., se debe eliminar y verificar la posición de los trenes a lo largo de la línea.
- En algunos casos el sistema debe integrar funciones administrativas. Por ejemplo algunos poliductos cumplen la función de transporte de líquidos de diversos tipos para distintas empresas. En este caso es necesario determinar programaciones y prioridades de acceso al servicio de transporte, facturación del servicio, etc. Los datos básicos para estas presentaciones son suministradas por el sistema SCADA, a través de las RTUs. En estos casos, el tipo de Estación Maestra utilizada resulta de la convergencia entre las necesidades del sistema SCADA y el sistema administrativo.

Sistemas ramificados. En este caso, el proceso abarca una superficie importante, como por ejemplo;

- Yacimientos
- Redes de distribución de gas, agua o electricidad.

Los sistemas asociados, a estos procesos dependen en forma importante de sus características particulares.

**SISTEMA SCADA AFECTADO POR CONTROL DISTRIBUIDO** El sistema de control distribuido tiene algunos subsistemas que aparentemente son aptos para el concepto de sistema de adquisición de datos para laboratorios, plantas industriales y procesos de inteligencia adquirida y capacidad de control. Pero igualmente con el envío de datos y las redes de área local pueden ser ligadas junto a esos sistemas de microprocesadores adquiriendo además la extensa distancia de transmisión que fue tradicional en los sistemas SCADA. Se dio así una combinación de los siguientes ingredientes de esta mezcla:

- Pocas unidades para algunos cientos de procesos desde sitios remotos que transmiten datos de cualquiera de los dos sitios que estén en demanda o donde este sucediendo un evento que requiera atención inmediata. Esas unidades terminales remotas (RTU) pueden permitir o no la recepción de la transmisión de datos.
- Un supervisor central, para proporcionar un alto nivel de carga en computación y optimización, generalmente una computadora anfitrión.
- Un sistema de transmisión de larga distancia de cableado ligero o sin cableado entre el RTU y el supervisor central.



- Un código del sistema que garantice la seguridad y confiabilidad del sistema de transmisión de información.

## APLICACIONES DE SCADA:

*SCADA PARA SERVICIOS.* Estos sistemas están típicamente fundamentados en las aplicaciones o usos industriales, cuando estos están a cierta distancia de las unidades de operación, se requiere de la supervisión desde una unidad de mando central. Estos tienen algún sistema de transmisión de poder que utiliza la electricidad gobernado por el supervisor anfitrión que permite una red de análisis para prevenir la sobrecarga y rompimiento del circuito de control para cargas iguales. La transmisión de poder desde una unidad a otra es manejado por el sistema, en donde por un instante de la región norte a la sur se da la transmisión de poder y el flujo inverso para invierno hasta verano. El paro y arranque de los generadores puede ser controlado desde una locación central.

En tuberías con líquidos, la estación de elevación de potencia remota es supervisada desde una locación central que puede también controlar el flujo de producto para secciones terminales a lo largo de la tubería. Del mismo modo en un sistema de transmisión de gas, la estación de compresión remota requiere de un supervisor central que permita también bajar la carga del coeficiente del gas como una condición de cambio. El sistema de agua y tratamiento de agua frecuentemente tienen gran facilidad para conectarse con una localización central.

El sistema tiene que ser afectado por un sistema de control distribuido integrado (DCS) donde el control supervisorio es llevado en una función ordinaria y secundaria. El sistema SCADA puede demandar más y más inteligencia de los RTU. Como un controlador programable está construido de una manera difícil de distinguir desde la computadora y como el sistema de adquisición de datos (DAS) incorpora más microprocesadores y contiene computadoras personales, se debe observar cuando esto afecta a el sistema tradicional.



## CAPITULO 6.            SISTEMAS    DE    CONTROL    AVANZADO.

Las soluciones de procesos continuos deben ser abiertas y universales. Abiertas, en el sentido amplio de integración dentro del sistema de información global de la planta, y universales, disponiendo de algoritmos de control que contemplen la dinámica del proceso, sus restricciones y las perturbaciones que influyen sobre el mismo, al objeto de cumplir criterios de optimización que minimicen las desviaciones respecto a los puntos idóneos de funcionamiento y la duración de las mismas.

En la realidad las entradas y las salidas no están ligadas por parejas de forma independiente, sino que existe una influencia en mayor o menor grado entre cada salida y todas o varias entradas al proceso. Así la formulación matemática del proceso sería la siguiente:

$$Y_1 = F_1 ( U_1, U_2, \dots U_n )$$

$$Y_2 = F_2 ( U_1, U_2, \dots U_n )$$

$$Y_3 = F_3 ( U_1, U_2, \dots U_n )$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$Y_n = F_n ( U_1, U_2, \dots U_n )$$



Siendo el número de salidas inferior o igual al número de entradas. Si para reducir los grados de libertad, y mediante lazos de control convencionales, asociamos las entradas y salidas (variables manipuladas y variables controladas) por parejas, como si de relaciones independientes se tratase, no se tiene en cuenta la influencia adicional de las restantes variables de entrada sobre cada salida o lo que es lo mismo, el movimiento de una variable de entrada afecta simultáneamente a varias salidas. Estas interacciones entre los lazos de control harán, en muchas ocasiones, incontrolable al sistema.

Pero aun con todo, el principal problema reside en la falta de conocimiento de la dinámica del sistema. Es necesario tener en cuenta quien va a fijar el comportamiento dinámico de las variables a controlar en el sistema de control. El planteamiento de las ecuaciones diferenciales o de las ecuaciones de estado para conocer el comportamiento dinámico del proceso puede resultar realmente complejo, e incluso, poco fiable, necesiándose sistemas de reconciliación y validación de datos.

Los modelos dinámicos de entrada-salida, basados en la acumulación de experiencia, según los datos obtenidos en planta, puede resultar de mucha mas garantía, además de no necesitar información o conocimiento previo alguno (orden del sistema, retardos, etc.).

Dos conceptos fundamentales separan al control convencional del control avanzado: la existencia del criterio de optimización (mínima varianza, lineal cuadrático, etc.) y el conocimiento de la dinámica del proceso (modelos internos). Ambos están íntimamente ligados. Así, el cumplimiento del criterio de optimización establecido permitirá el diseño específico de la función objetivo que deberá cumplir la especificación dinámica impuesta al sistema (tiempo, precisión y estabilidad); pero para todo ello, será necesario disponer de los correspondientes modelos dinámicos internos y de una tecnología que aplicada, permita ante todo una gran robustez en el diseño ante variaciones de la dinámica y no linealidades importantes. En definitiva, se ha pasado del control basado en señales, al control basado en modelos.



El crecimiento de la tecnología digital en los últimos años ha representado un desafío al área de control de automatización de procesos. Con la reciente disponibilidad de computadoras mucho más poderosas, los enfoques de los sistemas de control han sido reconsiderados, obteniéndose como resultados tecnologías radicalmente diferentes en el campo y entre sus principales ventajas cuentan con la capacidad de hacer los procesos individuales más seguros, más eficientes y con posibilidad de interacción con las variables del medio ambiente económico, de modo que en forma continua es factible hacer que complejos industriales completos operen en el punto óptimo de rentabilidad o bajo funciones objetivo dictaminadas directamente por la gerencia del complejo.

El **control avanzado** es definido como el uso de computadoras aplicadas al control y estrategias de optimización que maximizar la ganancia por unidad a través del incremento en los envíos, mejora la calidad del producto producido o reduce el costo de la manufactura del producto mientras que asegura el mantenimiento de la operación.

El punto de partida para una tecnología de control avanzado es contar con una plataforma de control distribuido, esto significa la concentración en un sistema de cómputo de todos los elementos de control de un proceso con tal que un ingeniero disponga de toda la información relativa a la medición, transición y situación de todas las variables de proceso de importancia en forma concentrada.

La información que se utiliza no constituye en esta fase una alteración de los objetivos de control y a las filosofías de operación y se deposita en base de datos de las que hará uso.

La siguiente fase de la tecnología consiste en realizar una identificación del proceso, propiamente esta etapa pertenece al campo de control avanzado, y consiste en realizar pruebas de campo donde se altera una variable manipulable como son los flujos principalmente, posteriormente se observa y se registra la forma como responden las otras variables del proceso.





Ya fuera de la línea generan modelos dinámicos, es decir ecuaciones matemáticas que representan en particular el comportamiento en el tiempo de un equipo o conjunto de ellos. Las ecuaciones obtenidas, aunque sencillas, son capaces de predecir, para otros valores de las variables manipuladas de donde se obtuvieron, la influencia de cada una de las variables controlables que se desean mantener en un valor de la franja permisible.

Usando los modelos en forma inversa, o sea, fijando las variables controladas a los valores requeridos u óptimos, es entonces que, matemáticamente en algoritmos programados en la computadora se puede resolver para obtener los movimientos en las variables manipulables correspondientes.

Junto a los programas de computadora usados se introducen estrategias de control con las que se puede asistir a la maximización de la rentabilidad de unidades y en mejorar su operabilidad mientras se mantiene una seguridad operacional. Las estrategias de control se aplican de un modo jerárquico tal que el control avanzado y los algoritmos de optimización manejan los puntos de ajuste (setpoints) de los controles regulatorios. Esta tipo de control jerárquico promueve operaciones seguras y no interfiere con la filosofía de control regulatorio o en la inherente capacidad de redundancia.

La siguiente etapa de la tecnología de control avanzado es la posibilidad de efectuar la optimización en línea con la inclusión de modelos matemáticos a régimen permanente. Esta etapa requiere usar programas de computación similares a los empleados en los simuladores de proceso comerciales y cuyo objetivo principal es generar valores de los puntos de ajuste (setpoint) que utiliza los modelos dinámicos descritos en el párrafo anterior. Estos puntos de ajuste generados son calculados tomando en cuenta los parámetros económicos que regulan el proceso como son costos de servicios, materia prima y precio de venta de productos de modo que en cualquier momento la operación de una planta es dirigida al óptimo en rentabilidad, tal como la defina la gerencia.

La optimización económica requiere el uso de modelos rigurosos en régimen permanente pues se debe encontrar el mínimo o máximo de las funciones objetivos donde están integrados en su totalidad las variables de la planta que influyen en la economía de la operación, en contraste con la fase anterior donde principalmente se atiende la dinámica de la operación.



La tecnología que se está imponiendo, empleada con gran éxito desde hace varios años en el control avanzado de plantas industriales y permitiendo un diseño realmente robusto, es el control predictivo, con cuya aplicación se consigue una solución universal al problema del acoplamiento.

La solución universal al problema del acoplamiento debe ser, por tanto, planteada como un único algoritmo, capaz de generara las salidas desacopladas de todas las variables controladas, cumpliendo simultáneamente los criterios de optimización impuestos al sistema, teniendo en cuenta la evolución dinámica de cada variable de salida, las perturbaciones y las restricciones impuestas al sistema.

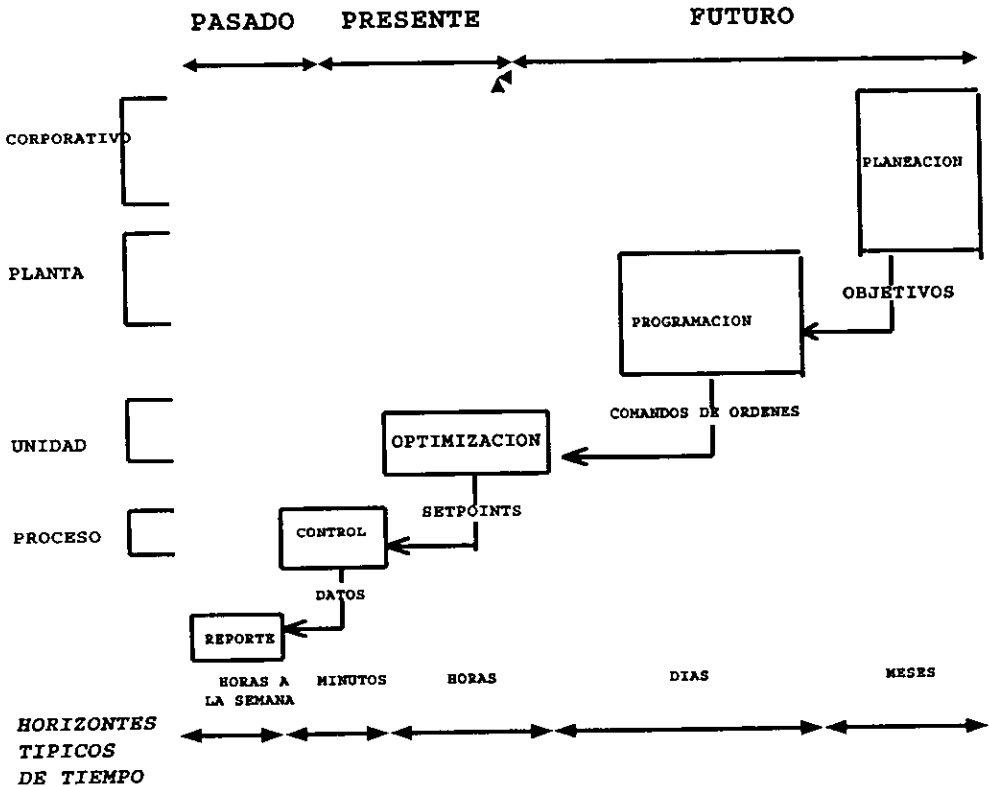


Figura 6.1. Esquema tipo cascada del sistema de información y control integrado.



**Ciclo de operación.** La meta común de todas las plantas es proveer de seguridad, ganancias, calidad en el producto manufacturado. Para llegar a esto se tiene que involucrar un ciclo de operación, este es determinado por las metas de producción inicial, plantas en desarrollo y especificaciones, desarrollo de la manufactura del proceso, monitoreo de los resultados, desarrollo del análisis de la información y suministro de los resultados finales como retroalimentación a las decisiones iniciales de la dirección del proceso.

Las herramientas, alcances y la importancia de cada una de esas funciones involucra cierto tiempo. El desafío es encontrar el camino hacia una planta de inteligencia artificial que produce máximas ganancias. Se puede presentar un modelo de lo que se pretende en este ciclo de operación:

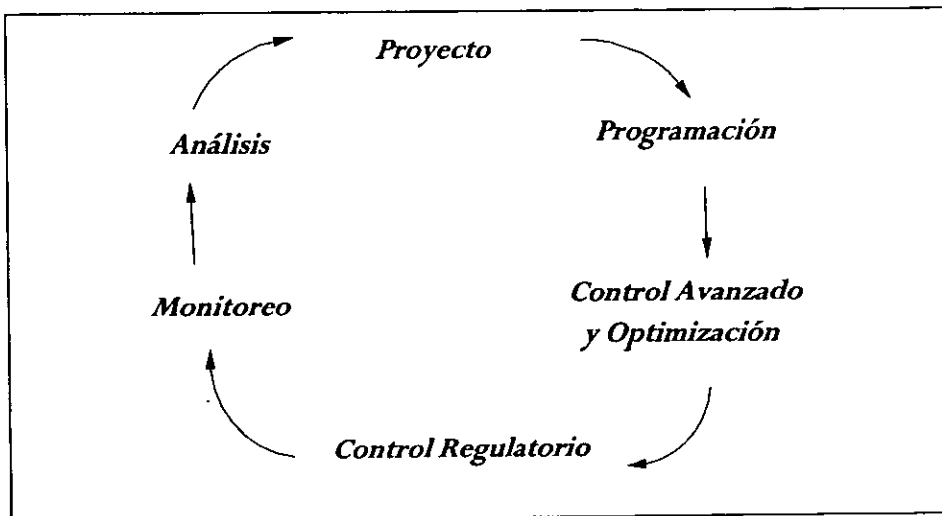


Fig. 6.2.Ciclo de operación.



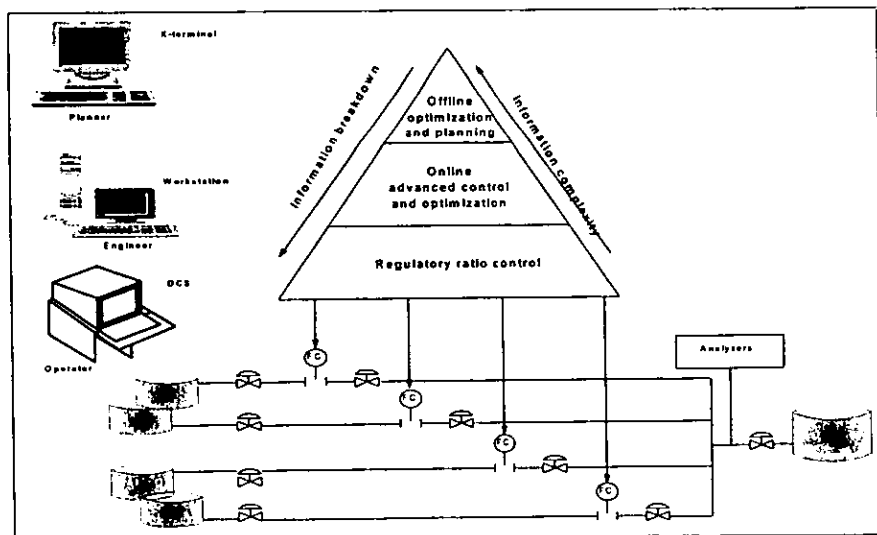
El *control avanzado* es una colección de herramientas distribuidas que se encuentran limitadas por las restricciones del proceso (valores mínimos o máximos para una variable de proceso o su velocidad de cambio) y el control de la calidad. Si se observa trivialidad a través de la implementación de las restricciones que sujeta la optimización del proceso se envía hacia los límites del equipo que siempre deben mostrar una ganancia extensa. Precisamente el control de la calidad permite mostrar el lucrativo incremento de los productos.



Efectivamente, el sistema de control avanzado necesita relación de datos en tiempo real permitiendo una respuesta rápida a los cambios del proceso. No obstante de la aplicación industrial, casi toda la instrumentación tiene deficiencias que hace la aplicación practica difícil. La calibración no optima de los instrumentos o la calibración de los mismos por operadores inexpertos provee de resultados con precisión insuficiente. La sensibilidad ante los factores del medio ambiente semejante a la temperatura externa o cambios en las condiciones de la muestra puede afectar el acercamiento. Los altos requerimientos de mantenimiento asociados con las complejas condiciones de la muestra o producto reduce esos atributos deseados.

**BENEFICIOS APARTIR DEL CONTROL AVANZADO/OPTIMIZACIÓN.** Los beneficios del control avanzado en proceso resulta principalmente del firme control de la calidad del producto enmarcado por las restricciones de la planta. Las técnicas estadísticas tienen que ser usadas para asistir en la identificación de los beneficios y en las auditorias de los resultados

Los beneficios varían de acuerdo a la configuración de la planta y las unidades en la forma que estas participen en el juego de control avanzado.





El paso ascendente del control avanzado es la optimización local del potencial del producto que significa beneficios para la aplicación de la información económica y la determinación de los modelos del proceso para determinados objetivos del control avanzado. Este papel de optimización fuera de línea es el empleo de corrientes de borde de constricciones de la planta a objetivos de datos de operación colocados en toda la planta en sus controles de nivel. También cabe mencionar que la construcción de la optimización con un factor económico firme es el escenario del control avanzado. Los beneficios pueden ser substanciales para cada variable, pero depende de la situación económica existente en ese momento.

La resolución se realiza mediante las mediciones del error usando técnicas estadísticas para poder identificar y corregir el origen del error. Se plantea un programa que usa un algoritmo de optimización para resolver y reconciliar los valores significativos del balance de la planta. Se puede resolver en poco tiempo las ecuaciones de balance de materia y energía.

$$\begin{aligned} X &= y + z && \text{Balance de materia} \\ X x_1 &= Y y_1 + Z z_1 && \text{Balance por componente.} \\ X x_2 &= Y y_2 + Z z_2 \\ \\ H x + Q &= H y + H z && \text{Balance de energía} \end{aligned}$$

Algoritmo de datos de reconciliación:

$$\begin{aligned} X_i &= X_{i\cdot} + \xi_i && X_i = \text{valor medido} \\ & && X_{i\cdot} = \text{valor reconciliado} \\ & && \xi_i = \text{error en la medición del valor} \\ & && \sigma_i = \text{error en la desviación} \\ \min. & \left[ \sum_{i=1}^m (X_i - X_{i\cdot})^2 / \sigma_i \right] \\ F(x_{i\cdot}) &= 0 \end{aligned}$$

De acuerdo a las fórmulas planteadas para la reconciliación de datos se tienen los siguientes:

- decremento de la pérdida de materia prima,
- mejora en las decisiones de administración,
- detección en la falla de los instrumentos,
- localización de la instrumentación de la planta y justificación de la instrumentación del proceso,



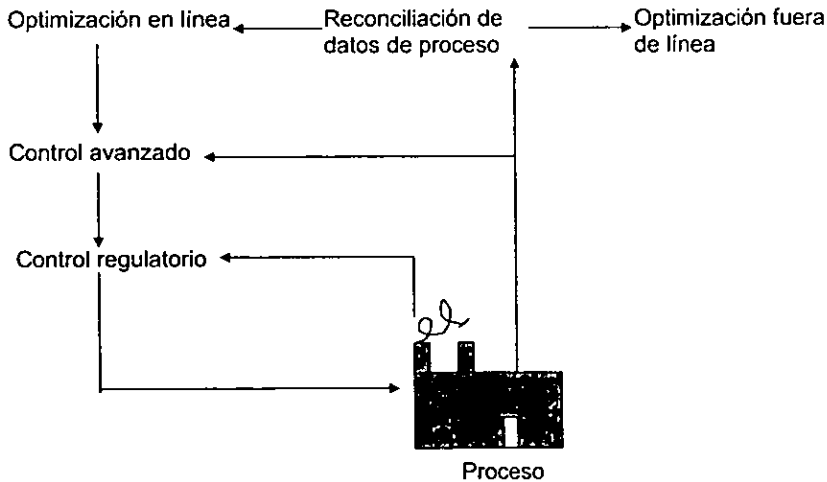
## ■ Optimización del proceso.

También se pueden realizar labores tales como:

Análisis fuera de línea : - limpieza de intercambiadores,  
- impacto de succión en los equipos,  
- análisis del comportamiento operacional .

Análisis en línea : - determinación de óptimo global: mínimo consumo energético, máxima conversión y/o fraccionamiento,  
- maximización de carga a la unidad,  
- maximización del producto valioso,  
- reportes del consumo de energía,  
- reportes del balance de masa.

En la optimización del proceso se recurre a la simulación rigurosa del proceso donde el objetivo es optimizar la operación del proceso. Se utilizan modelos rigurosos por que solo a través de ellos es posible determinar un óptimo global.



**Métodos heurísticos:** son modelos basados en análisis matemáticos sin el uso de las leyes físicas involucradas, tales como: redes neurales, identificación multiparámetrica, algoritmos difusos, etc. La optimización basada en estos modelos tiene un rango de validez corto por lo que solo permite obtener óptimos locales y algunos de estos serán tratados en los siguientes capítulos.



Con respecto a la implementación de los sistemas de control avanzado se debe establecer un estudio costo/beneficio para decidir si se lleva a cabo el proyecto o si este no representa el beneficio económico esperado. Basándose en la experiencia a lo largo de todo el mundo se han establecido 5 elementos clave para asegurar una planeación óptima del trabajo ha desarrollar en dicho proyecto.

1. **PLAN: objetivos, programas, acontecimientos.**
2. **TECNOLOGIA: conocimiento, paquetes, soporte.**
3. **PLATAFORMA: hardware, software.**
4. **STAFF: organización, desarrollo.**
5. **METODOLOGIA: definición, designación, implementación, puesta en marcha, instrucción.**

Cada planta puede tener elementos que son mas o menos importantes, pero en general los elementos mas importantes para todas ellas es el plan, el staff (organización) y la metodología de proyecto. Al ser la metodología uno de los elementos mas importantes en dicho desarrollo se ha establecido a lo largo de los años una metodología extremadamente beneficiosa (establecida por SETPOINT). Esta metodología es particularmente una fuente adecuada para los requerimientos de planeación, especificación, designación e implementación de la información y los sistemas de control. Y dicha metodología se muestra en la siguiente tabla:





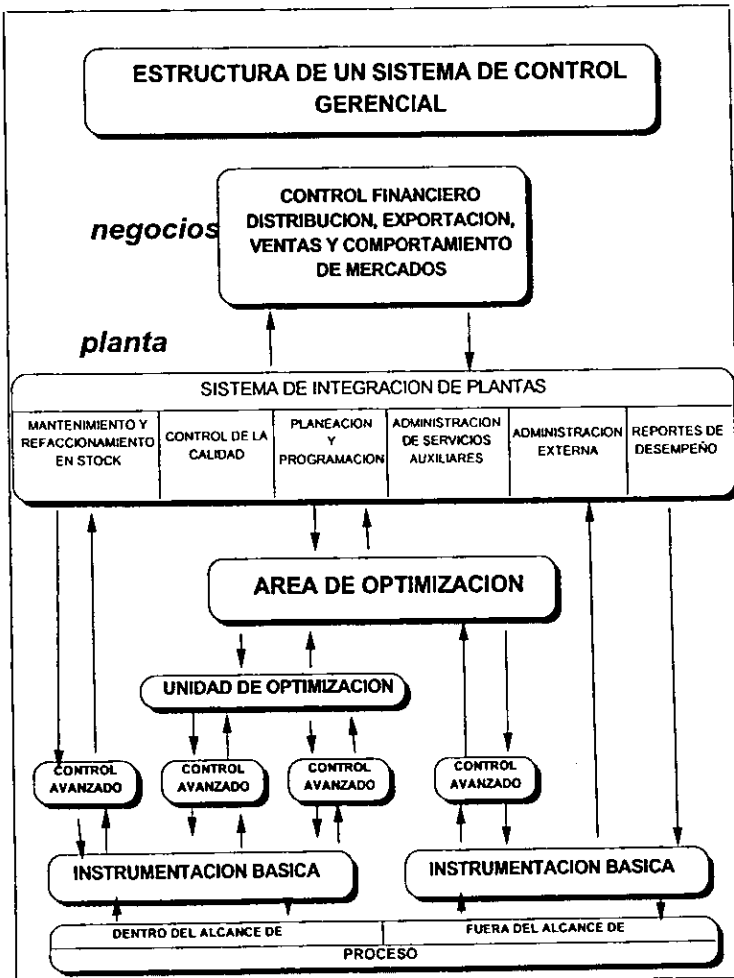
- **PLAN MAESTRO.**
  - \* evaluación profesional
  - \* metas y objetivos
  - \* oportunidad de beneficios
  - \* costo presupuestario
  - \* programas y acontecimientos
- **ESPECIFICACION FUNCIONAL.**
  - \* análisis de la operación
  - \* establecimiento del alcance de las funciones
  - \* especificaciones del hardware y software
  - \* estimado de los beneficios
  - \* estimado de costos
  - \* plan de proyecto
  - \* apoyo (staff)
  - \* responsabilidades
- **IMPLEMENTACION DEL PROYECTO.**
  - \* designación de detalles
  - \* instrumentación
  - \* software de la computadora y base de datos
  - \* aplicación de la programación
  - \* demostración
  - \* instalación y reconocimiento
  - \* aplicación de la acción
  - \* entrenamiento
  - \* auditoría

El plan maestro proporciona la visión para el programa de desarrollo del sistema de optimización. Con esta herramienta de planeación, la planta puede trazar el camino a través del cual se desarrollara su optimización considerando las prioridades sobre cambios que ocurran a lo largo de la ida productiva de esta, usando la tecnología como elemento de desarrollo.

La especificación funcional es importante como una guía detallada para la implementación de los bloques de la especificación para la construcción del proyecto de control avanzado.



La implementación del proyecto incluye algunos pasos importantes en lugares específicos de los bloques de construcción en servicio. Sobre el plan maestro original el trabajo con los detalles de designación y la instalación de niveles puede ser desarrollado en armonía con los planes para el futuro.





### **ESTUDIO COSTO/BENEFICIO:**

Sobre los requerimientos para el estudio se deben mencionar los siguientes:

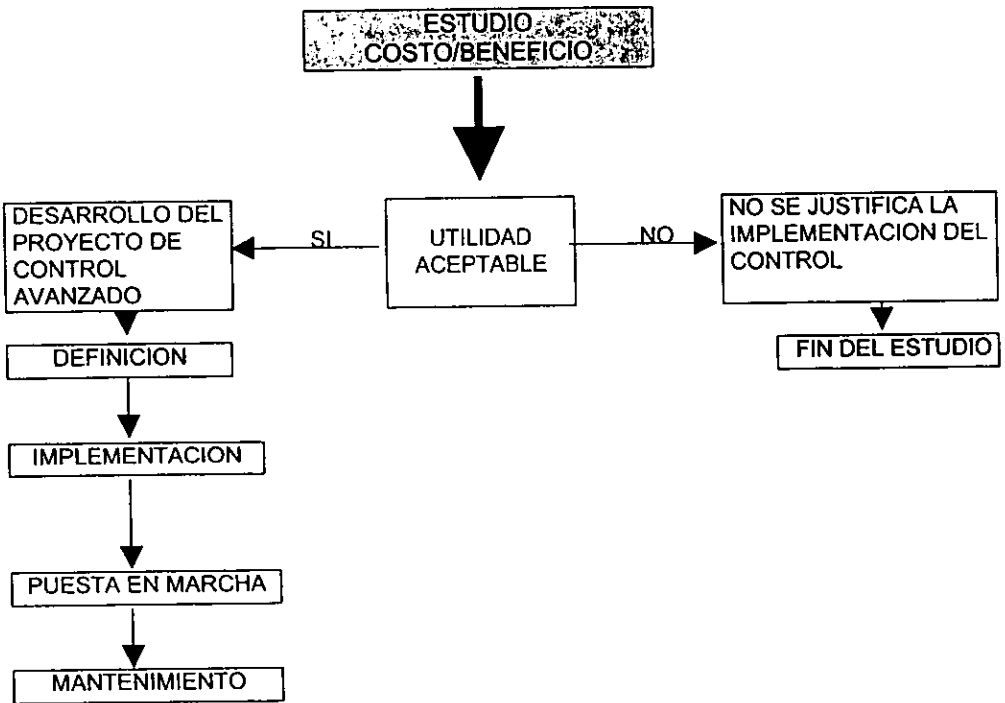
- ( A ) Condiciones operativas existentes
- ( B ) Reportes estadísticos:
  - bitácora de producción
  - reportes de laboratorio
- ( C ) Comparación de diseño contra práctica

Los recursos humanos requeridos son: Ingenieros químicos especializados en instrumentación, monitoreo y control; Ingenieros de procesos y operación de plantas; Especialistas en programación y diseño de sistemas de informática; Ingenieros en comunicaciones y electrónica especializados en automatización de líneas de producción con PLC's y Especialistas fisicomatemáticos o Ing. Químicos en simulación rigurosa de proceso.

El software requerido:

- paquetería de apoyo en la ejecución de estudios costo/beneficio,
- paquetería para simular y optimizar procesos industriales,
- paquetería para el análisis y síntesis de control multivariable,
- software diseñado para simular control adaptativo no lineal,
- software para modelado y simulación de sistemas de control dinámico,
- paquetería diseñada para métodos de búsqueda de puntos de optimización en los sistemas de procesamiento.

En cuanto al hardware se deberá disponer de un equipo con las características suficientes para la adecuada ejecución del software antes mencionado (computadoras VAX, HP, IBM, SUN, impresoras, periféricos).



El objetivo de este tipo de control, el control avanzado, es aumentar la controlabilidad de los procesos, esto es, la habilidad de los circuitos de control de manejar condiciones cambiantes en rangos cada vez mas amplios, lo que en algunos casos se logra mediante la aplicación de técnicas complementarias al control PID, mientras que en los otros se requiere la aplicación de técnicas relativas a la teoría moderna de control automático.

Del control avanzado de procesos, se diferencian tres niveles los que se caracterizan por su grado de complejidad matemática, los que son:

- *Control avanzado de bajo nivel.* Se caracteriza por utilizar recursos sencillos de procesamiento y compensación de señales y circuitos prealimentados.



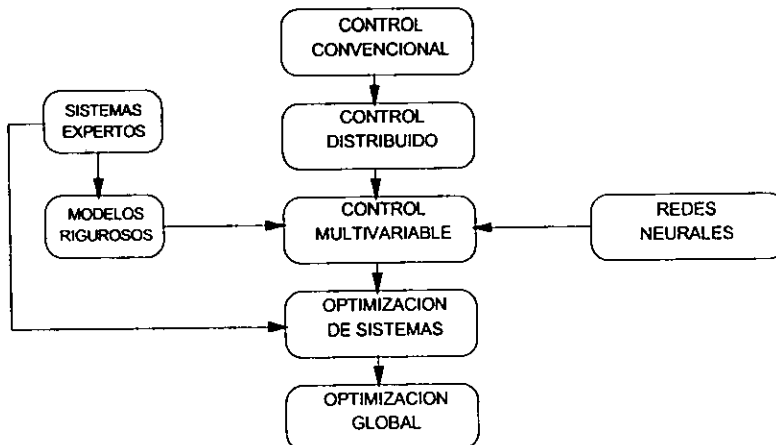
- *Control avanzado de medio nivel.* Utiliza técnicas mas complejas para el control, requiriendo normalmente para su procesamiento de dispositivos auxiliares de calculo, los ejemplos mas comunes de este tipo de técnicas son los siguientes:

- \* Control Adaptivo
- \* Autoentonamiento
- \* Lógica Difusa
- \* Control por restricciones
- \* Control predictivo
- \* Modelación estática de los procesos
- \* Control estadístico de calidad
- \* Control multivariable/desacopladores
- \* Sistemas expertos

- *Control avanzado de alto nivel.* En este nivel se consideran los métodos mas avanzados del control, los que para su aplicación requieren de una labor muy especializada, necesitándose el uso de procesadores de muy alta capacidad, que generalmente son minicomputadores del tipo VAX o similares. En esta clasificación se tienen a las siguientes estrategias:

- \* Control multivariable predictivo
- \* Sistemas neurales
- \* Integración a gran escala

### UBICACION DEL CONTROL AVANZADO EN LOS NIVELES DE AUTOMATIZACION





Un numero de tecnologías emerge en los pasados 10-15 años y cuando son obtenidas, tienen el potencial para tener un dramático efecto sobre el desarrollo y las operaciones de seguridad de los procesos industriales. Este cambio desde la tecnología de sensor inteligente hasta el control avanzado es el mas reciente "sistema inteligente"

*Modelo basado en control predictivo.* Una de las mas frecuentes tecnologías de control que surgen en la década de los 80's fue la existencia del modelo basado en el control predictivo (MBPC). Esto es una fuente particularmente de retroadaptador. La reducción remarcable de una comparación de posible varianza con el mejor de los controles convencionales. Esto es indudablemente el establecimiento de una técnica significativa pero es inverosímil para la impresión del manejo escéptico. Se puede mostrar de ese modo, el costo de energía/tonelada de producto antes y después de la aplicación del mejoramiento del sistema de control.

El beneficio fue alrededor del 7 % de ahorro de energía donde la operación es cerrada para constricciones. Esta forma de control es ahora un nuevo lugar común en algunas de las organizaciones avanzadas.

*Validación propia de los sensores.* Claramente, el control depende de las buenas mediciones y éstas están siendo un trabajo reciente del desarrollo en la validación propia de los sensores. Este aparato toma el avance de la generación moderna de un sensor digital donde tiene la construcción dentro de un microprocesador. La evaluación común para la detección de fallas valida las lecturas y proporciona la calidad de la información total para las mediciones en sí mismo. Los controladores actualmente muestran la disposición para tener el conteo de esa información y puede ser posible la reconfiguración del control para minimizar el efecto de la falla sobre el desarrollo del control.

*Mediciones inferenciales.* En la manufactura química tradicional algunos productos son producidos y no vendidos por no alcanzar la composición química debido a la velocidad de varios efectos sobre el producto. Un efecto es frecuentemente físico y puede ser para un polímero cuando se relaciona con la viscosidad o la fuerza. Haciendo mediciones fuera de línea de semejantes características es frecuente la dificultad que puede tomar un extenso tiempo. Desarrollo en mediciones inferenciales (soft-sensing) muestran una gran promesa y pueden seguir la medición de la calidad primaria o crítica para ser inferida con la frecuencia de la segunda y mas fácilmente hacer las mediciones. Estas técnicas son particularmente



ayudadas cuando es necesaria para monitoreo y control en un proceso cerrado durante, por ejemplo, un gran cambio.

En la predicción de una medición de la calidad de un polímero usando modelado de redes neurales. Un número sencillo de mediciones del proceso pueden usarse en la predicción. Las mediciones de laboratorio son difíciles de hacerse y toman un tiempo extenso. El predictor aprende las mediciones de laboratorio verdadero por algunas horas. El firme control con el operador puede sostenerse debido a las señales dentro de la operación de la planta cuando un predictor de calidad es suministrado tiene la producción de materia durante los cambios de producción.

Esto es una pequeña duda que los siguientes años pueden aclarar en un dramático incremento dentro de la aplicación de las redes neurales y otras técnicas para poder determinar la calidad de las variables y del control directo de las propiedades del material.

*Proceso de monitoreo.* En algunos respectos, la complejidad de la tecnología de control moderno junto con el incremento de la naturaleza interactiva de la planta moderna puede obscurecer el conocimiento de el entendimiento de la operación de proceso y complicar el diagnóstico de operación anormal o malfuncionamiento del proceso.

Sobre plantas con cantidades masivas de datos estos, son colectados rutinariamente pero no son usados efectivamente. Si es generalmente conseguido este beneficio cuando puede provenir desde las propiedades usando el manejo de sistemas de información que es de una magnitud similar para ser realizada desde el completo y propio uso del control de procesos avanzado. Esto no tiene un desarrollo en paralelo cuando proporciona la operación personal y la línea de manejo como una herramienta para asistir las estrategias de decisión de alto nivel involucradas en el desarrollo de la planta química en su mejoramiento. Todos los datos pueden ser usados para extraer la información pero esto es un problema real con la información sobrecargada.

Una técnica que puede ser aplicada para la solución de ese problema es el análisis del componente principal que es una herramienta que reduce el dimensionamiento de los datos originales por definir el establecimiento de una nueva variable donde se expande la máxima cantidad de variabilidad en los datos. Si se trata de solamente unos componentes de alimentación principal puede oportunamente capturar la mayoría de la variación de interés. Esto es posible para reducir un problema multivariable del uso de



dos dimensiones. Un ejemplo es para una planta donde esta el conocimiento dimensional en dos.

Si es detectado en el proceso un movimiento fuera de control, es necesario para el operador checar sobre el desarrollo de la variación de la planta. Esto puede ser por referencia para la medición de la planta. El cambio en los parámetros observables de la planta son los punto mas destacados.

*Algoritmos genéticos.* Cerrando el pico de la pirámide de control esta la operación de optimización. Cuando el control permite a las variables adherirse al deseo de variables totales y a las constricciones, la optimización determina cual es el valor deseado para esa consideración económica. La optimización económica es usada en los procesos industriales y esas son algunas de las técnicas proporcionadas con fuentes competitivas con constricciones y casi todas son rápidas y eficientes. Probablemente la optimización económica añade entre el 5-10% de la potencia total para mejoramiento.

Los diversos métodos de optimización tienen sus ventajas y desventajas en la aplicación particular. Esos métodos son de objetivos simples. Si es posible relacionar todos los factores como son materia prima, productos y coproductos con el común denominador de costos, ganancia/hora, y quizás esto no es desventaja. En algunos casos esto no es posible. Esto es en el área donde la tecnología emerge del algoritmo genético para ser capaz de ayudar.

Esta técnica basada en las ideas de Darwin de la supervivencia, de adaptación, selección genética y mutación tienen alguna ventaja por ejemplo, ellos no requieren de información derivativa, continua y de variables discretas que pueden ser arregladas, estas son aplicadas en un gran rango de problemas y puede ser proporcionada a un gran numero de soluciones potenciales.

Estos pueden ser aplicados para la designación de una maquina de pistón donde el compromiso y trato-equivocado puede ser hecho. Estos tienen la potencia para ser aplicada además para la designación de la planta de proceso donde un numero de objetivos semejantes a el costo de capital, eficiencia de operación e impacto ambiental tiene que ser considerada y fuera de una ganancia.





Los algoritmos genéticos imitan el proceso de la evolución biológica con sus ideas de selección natural y sobrevivencia para proveer soluciones efectivas para problemas de optimización y calendario. Este método fue desarrollado por John H. Holland en la década de 1960.

Los algoritmos genéticos (AG) usan el concepto de estados de solución presentados en cadenas de valores binarios donde una pieza de información es análoga a un gen y la cadena es análoga a un cromosoma. Un grupo (población) de candidatos de estado de solución (cromosomas) es generado y evaluado. Se usa una función de capacidad para evaluar cada una de las soluciones en la población. Los cromosomas que contienen los mejores códigos son separados y recombinados usando operadores genéticos como la transferencia, mutación y recombinación para crear nuevas soluciones (hijos) que generalmente son mejores preparados que la combinación (generación) anterior.

Como este método es significativamente diferente a otros métodos de búsqueda y optimización, los algoritmos genéticos han sido utilizados satisfactoriamente en problemas de búsqueda y optimización para los cuales otros métodos han fallado. Los AG han demostrado ser adecuados para la optimización de sistemas multivariables no-lineales específicos y se usan para una gran variedad de usos, incluyendo la preparación de horarios, asignación de recursos, adiestramiento de redes neurales artificiales y selección de reglas para sistemas de lógica difusa.

La programación genética aplica el concepto de AG a la generación de programas de computadoras. La programación evolucionaria usa mutaciones para evolucionar poblaciones. Las estrategias evolucionarias involucran muchas características de los AG pero usan parámetros con valores reales en vez de parámetros con valores binarios. Los sistemas de aprendizaje y clasificación usan AG en el aprendizaje mecánico para evolucionar poblaciones de reglas de condición/acción.

Las computadoras pueden utilizar modelos de procesos para determinar las acciones del control. El control avanzado, control basado en modelo, es muy diferente del control clásico proporcional-integral-derivativo, y puede hacer un mejor trabajo para manejar problemas de control clásico asociados a comportamiento dinámico incorrecto, restricciones, alteraciones y no linealidades.



Básicamente, en el control basado en modelo (MBC) la computadora usa un modelo del proceso de tres maneras:

1. Primero, en el modo de modelo utiliza el modelo para pronosticar la respuesta del proceso.
2. Segundo, en el modo de ajuste, ajusta el modelo para adaptarse a los cambios del proceso.
3. Tercero, en el modo inverso, usa el modelo para determinar la acción de la variable manipulada (MV) que actúa la variable controlada (CV) a lo largo de una trayectoria deseada hacia el punto de ajuste (Set Point).

Todos los modelos son imperfectos. Los datos con ruido, con perturbaciones, calibrados de manera incorrecta no representan bien al proceso. Idealmente, una graficación de los valores pronosticados por el modelo comparados contra los valores medidos en la realidad, caerían en una línea 1:1.

Con ruido, un modelo ideal no mostraría polarización, sesgo, o curvatura en el contorno de los datos sobre la línea 1:1. Debido al ruido, las mediciones estadísticas son apropiadas para clasificar la solidez del modelo. Las tareas clásicas podrían ser la prueba de graduación para la polarización, la prueba de pendiente t para el sesgo, y una prueba de carrera para la curva.

Para validar el modelo es necesario comparar el modelo con los datos del proceso y estadísticamente asegurarse que el modelo captura el comportamiento real del proceso y que los parámetros empíricos tienen valores conocidos confiables. La bondad del control depende de que tan bien el modelo representa al proceso, todos los modelos son imperfectos, aun si el modelo fuera perfecto el proceso miente (datos con ruido representan mal al proceso) de ahí que el modelo deba ser evaluado.



El comportamiento de la dinámica del proceso es una medida de las dificultades del control. En una clasificación sencilla de dificultades de control, establecida por la ISA, se incluye:

- Dinámicas problemáticas:

Tiempos muertos  
Inversas

- No muy difíciles:

Integración  
Lazo abierto inestable

- Rebanadas de pastel:

Retrasos elementales  
Retrasos de orden superior

La uniformidad del producto en algunas plantas es determinado por la integridad de los sistemas que controlan los parámetros del producto clave. Algunos de estos sistemas de control están multiconectados, son no lineales y ofrecen una complejidad total.

Teniendo una brecha entre las aplicaciones prácticas y la teoría esto es uno de los desafíos de las labores de los ingenieros y de los profesionales de control. En resumen, algunos trabajos de control avanzado emanados de conceptos o simulación pueden fallar debido a múltiples razones cuando son puestos dentro de un ambiente en tiempo real.

El desarrollo de todas las estrategias de control avanzado deben considerar factores, adelantos, que son críticos para una operación exitosa. Estos factores pueden incluir :

- a. Soporte en términos extensos: casi todos los sistemas de control avanzado necesitan algún grado de soporte en términos extensos. Casi la mayoría de los sistemas de control desarrollados no permanecen localmente, se debe considerar una instrucción suficiente en el personal técnico y de operación como un requerimiento estándar mínimo. Esto puede ser complementado con la disponibilidad de una expansión no local con las especificaciones del sistema.



- b. Integridad del control regulatorio: el control avanzado es construido generalmente en fases. Un error común es asumir ese control regulatorio asociado a la fuente del trabajo. Asegurando con adelantos la integridad de la asociación de todo el control, la compensación de tiempo muerto, afinación, equipos de seguridad, etc.
  
- c. Integridad de mediciones: esto es un riesgo, checar el acercamiento y la confianza de las señales de los instrumentos. Algunos controles avanzados pierden aquí su estrategia de control y son frecuentemente censurados. Recordando que se tiene que checar la integridad de la muestra del laboratorio resultado de la incorporación dentro de la estrategia de control.
  
- d. Procesos no lineales: asegurando la adecuada linealidad sobre el rango de operación esperado. Anticipándose a futuros cambios en el rango de operación y cuando o como las fuerzas afectan la integridad del control. Considerando las especificaciones de la ganancia u otra opción no lineal para ser incorporada dentro de la estrategia de control.

El resultado de la economía actual lleva a la implementación de una variedad de sistema de control avanzado y optimización diferente de planta a planta. El retorno económico es una función del tamaño de la planta, valores del producto, costo de la alimentación, costo de la energía y la operación de la planta corriente. La siguiente sección describe los beneficios generales del resultado de la aplicación del control avanzado en cada unidad de proceso.

La tabla 1 muestra los resultados del beneficio económico típico desde el control avanzado mejorado para una planta de capacidad moderada (400 000 toneladas métricas/año) con un valor de salvamento anual total en un orden de \$5.6 millones.



<b>Area de la planta</b>	<b>Beneficio anuales miles de dólares</b>
Hornos	\$ 3 000
Area de apagado	\$ 150
Columnas de destilación	\$ 2 000
Compresores de refrigeración	\$ 100
Convertidores de acetileno y MAPD	\$ 400
Total	\$ 5 650

La tecnología de control en las plantas de aromáticos. El valor de salvamento al que se llegue depende de los siguientes factores:

- A través de la planta,
- Producto alimentado/precio de la materia prima,
- Costos de utilidad,
- Constricciones de la planta,
- Capacidad de créditos,
- Calidad de la operación sin controles avanzados,
- Acercamiento y frecuencia de los modelos de planeación existente.

A través de estos factores que juegan un importante rol en la determinación del origen y magnitud de los beneficios esperados. El objetivo principal del control avanzado y los sistemas de optimización puede ser establecido como:

Producir la máxima cantidad de los productos mas valiosos con un mínimo costo.

Este objetivo es alcanzado con la combinación de:

1) Rasgos de control avanzado con la estabilización de las unidades de operación y permite las aproximaciones de los limites del proceso y la especificación de productos.

2) Función de optimización para evaluar el beneficio económico semejante a el costo económico contra el valor de recuperación de producto y seguridad del reactor contra las señales de los productos finales.

Un resumen de los rangos típicos de beneficios económicos para cada una de las plantas de aromáticos es mostrada en la tabla 2. En algunos casos, el origen del mayor beneficio es por el incremento de la



capacidad de operación de la planta cerrada para la especificación del producto y las constricciones de los equipos. Un incremento razonable en la capacidad es esperado por el control avanzado en un orden de 3 a 10 porciento.

**Tabla 2 . Beneficios del control avanzado para una planta de aromáticos.**

<b>Unidad</b>	<b>Rango de beneficio a través de la planta \$ U. S. / BBL</b>
Plataforma	\$ 0.10 - 0.35
Unidades de sulfonacion	\$ 0.08 - 0.30
Unidades Udex	\$ 0.12 - 0.35
Columna de Benceno	\$ 0.01 - 0.05
Columna de Tolueno	\$ 0.02 - 0.08
Columna separadora de C <sub>8</sub>	\$ 0.00 - 0.04
Columna Eb	\$ 0.05 - 0.15
Unidad Isomar	\$ 0.01 - 0.09
Unidad THDA	\$ 0.15 - 0.55
Unidad Tatoray	\$ 0.01 - 0.09
Unidad Parex	\$ 0.02 - 0.08

Cuando el control avanzado es aplicado, las expectativas son generalmente altas. Bajo las condiciones de operaciones reales, sin embargo, las funciones de estos controles son frecuentemente de riesgos como un resultado de lo inadecuado de los instrumentos, la falla de los instrumentos o al pobre ajuste de los instrumentos. La conclusión sobre el fallos de las herramientas o del personal que desarrollo el control es frecuentemente difícil o imposible.

Algunas de las empresas que se dedican a establecer este tipo de control se retiran periódicamente o los reportes técnicos son frecuentemente publicados antes que el suceso pueda ser demostrado. O si se encuentra una falla, los reportes son pobres y son juzgados sobre el mérito de una idea y no de el resultado. Se debe proporcionar algún camino a partir de la experiencia basada en la ardua labor de implementar día a día unos parámetros usando operaciones reales y situaciones de problemas reales en las plantas.



## **CAPITULO 7.            SISTEMAS     EXPERTOS.**

Aunque el termino "inteligencia artificial" evoque respuestas excepticas de muchos profesionales de la industria, las herramientas de la inteligencia artificial y los métodos están siendo hechos para incursionar en la industria de los procesos químicos.

Desde luego algunos de los métodos de la inteligencia artificial han probado su valor en el mundo real, los sistemas expertos son, por mucho, la mayor fuente de conocimientos en la inteligencia artificial. Las redes neurales son semejantes en sus aplicaciones, como una herramienta utilizada favorablemente que puede ser desarrollada. Otro método, mas exotérico, son los algoritmos genéticos, su residencia fijada principalmente en el cuerpo de la investigación, como tal.

La resolución de problema por la utilización del razonamiento, semejante al entendimiento de un idioma por la asociación de imágenes, análisis de escenas en una visión de computadora, son un firme componente humano, de ese modo se obtiene una solución de razonamiento común con la sensibilidad requerida únicamente. Sin embargo para la implementación prospera de labores tales como:



- planeación del movimiento del robot ( autómata )
- síntesis de componentes químicos
- configuración de sistemas de computadoras
- soporte de decisiones
- diagnóstico médico
- designación de ingeniería

Requieren de un profundo conocimiento de un dominio experto y sus habilidades profesionales en el dominio o campo. Los sistemas de inteligencia artificial construidos para este propósito y que utilizan fuertemente el conocimiento del campo específico de un experto humano, son llamados sistemas expertos.

Un sistema experto es un programa de computadora que resuelve problemas que son usualmente resueltos por un experto humano. Por eso los sistemas requieren de una pequeña relatividad, gran homogeneidad de la base de conocimientos y un poderoso mecanismo de inferencia.

Si puede el sistema experto, en principio, reemplazar a un experto humano, aconsejarlo o asistirlo como apoyo. Esto requiere solamente un conocimiento específico del campo o dominio de ellos con la cooperación de el conocimiento del ingeniero, y con el aumento del dominio experto estos sistemas fueron incrementados popularmente. Estos son los medios mas apropiados de la inteligencia artificial para resolver problemas, penetrando sucesivamente y del mismo modo aplastaron muchas disciplinas y campos de actividades de la ingeniería y la ciencia. El gran poder de las herramientas desarrolladas contribuyen a esto. Sin embargo, esto no es una razón para ignorar las dificultades y problemas pertinentes a ciertas situaciones que se encuentran sin resolver cuando el desarrollo de un sistema experto puede ser confrontado con el mismo.

Muchos de los sistemas expertos desarrollados en los últimos 20 años han sido implantados como sistemas basados en reglas de producción. Una de las razones es que ciertos tipos de conocimientos experto puede ser codificado muy fielmente como conjunto de reglas, de ahí que algunos afirmen que el sistemas expertos es un arreglo de reglas de decisión - causa o algoritmos que formula la combinación de los conocimientos de algún experto humano.





Al decir que los sistemas expertos son originados como un camino para delinear con información activa que puede ser codificada en reglas sobre la inteligencia artificial. Esto oculta el origen de la técnica y carácter del sistema experto. Los sistemas expertos originados como una ciencia de la computación usan la muestra de una replica del diseño básico, clasificación, reglas basadas en el comportamiento de un compilador de frases u oraciones, pero para propósitos mas generales. Pasados los años la tecnología de la compilación adquirió un alto nivel de sofisticación y eficiencia, esto fue por deducciones mas que por el entendimiento del lenguaje sujeto que es la tecnología de compilación en si.

Sin embargo, un sistema experto, ahora extenso y oculto, puede avanzar solamente por el desarrollo del mejor entendimiento de su aplicación individual.

El reconocimiento del patrón del concepto de control adaptativo, fue desarrollado primero en 1965 pudiendo tener la visión de como el primer sistema experto era aplicado al control de proceso. Este hecho fue conveniente para la comercialización de un conocimiento completo de la tecnología adaptativa.

El concepto involucra el uso de características de diseño en una simple retroalimentación para ajustar los parámetros del controlador básico PID para lograr el diseño de la respuesta deseada. Esta capacidad se tiene como característica general en los sistemas expertos. Esta retroalimentación puede ser formalizada por la función de mapeo implícito de los parámetros de ajuste para los rasgos de valores correspondientes a estos.

Estas funciones no son lineales, elemento suficiente para que los extremos de los rangos de operación normal de la retroalimentación fuera ineficiente. Y además los sistemas incluyen las reglas de sistemas expertos convencionales para proteger los sistemas desde condiciones excesivas. La afirmación define las diferentes reglas de condición donde se tienen diferentes regiones de operaciones enumeradas de acuerdo a las reglas apropiadas y todas esas diferentes regiones pueden cambiar con las diferentes características del proceso. Un estudio apropiado de la adaptación se basa en los detalles de estudio de los planos y regiones; el sistema experto de los actos ideales como solamente un barrido de conocimiento.



Las reglas de proceso de ese sistema experto es nada mas que el estamento tradicional sujeto a las declaraciones "si" para un gran rango de procesamiento. Pero una regla puede ser clasificada mas adelante como una función discreta particular. Por ejemplo, la declaración de la figura 7.1. puede ser vista como parte de una tabla de verdad.

*Fig 7.1. Declaraciones como una función parcial ( tabla de verdad).  
Si todo el reactor esta demasiado caliente y se descarga el agua de enfriamiento entonces el reactor esta fuera de control.*

Reactor demasiado caliente	Descarga de H <sub>2</sub> O de enfriamiento	Reactor fuera de control
falso	falso	indefinido
falso	verdadero	indefinido
verdadero	falso	indefinido
verdadero	verdadero	verdadero

Reducido para términos mas convencionales, la función de un sistema experto, ahora es la ejecución de algunos caminos diferentes:

- simple ejecución de la función
- inversión de la función
- identificación de la función
- provisión para un orden de ejecución mas general (comparado con las declaraciones convencionales "si").

Por ejemplo, en la figura 7.2. se muestra una tabla de verdad ( para la función  $C=A \text{ y } B$  ). Las funciones de la tabla de verdad son fácilmente computadas con el entendimiento de la lógica booleana. Con la representación de falso con 0 y de verdadero con 1, la combinación de 00, 01, 10, 11 de la tabla de valores independientes combinan la constitución de una fácil computación en la dirección de la tabla, para localizar la independendencia de los valores dependientes. Esta tabla puede ser invertida por el ajuste alrededor ( y clasificar por conveniencia ). La inversión define valores para A y B como una función de C. En este caso estas son tres diferentes posibilidades de solución de A y B para un simple valor falso por C. Este comportamiento no es diferente al mostrado para una función continua no-monotona.



Fig 7.2. Inversión de la tabla de verdad.

			Invertida		
A	B	C	A	B	C
falso	falso	falso	falso	falso	falso
falso	verdadero	falso	falso	falso	verdadero
verdadero	falso	falso	falso	verdadero	falso
verdadero	verdadero	verdadero	verdadero	verdadero	verdadero

La identificación del apropiado modelo de la tabla es igualmente simple. Considerando dos posibles modelos de alguna relación, uno, una Y y otro una O, combinados en una tabla simple como en la figura 7.3. En este caso la tabla es computada por secciones, no solamente de los valores de la variable independiente, pero si de un tipo de modelo como fuente. La identificación de la conversión de la inversión en esta nueva tabla soluciona cada tipo de relación desde ambas variables de entrada y salida.

Fig 7.3. Regla/Inferencia de la tabla de verdad/Identificación.

			Identificación				Resolución				
Modelo	A	B	C	A	B	C	Modelo	A	B	C	Modelo
and	falso	falso	falso	falso	falso	falso	and	falso	falso	falso	and
and	falso	verdadero	falso	falso	verdadero	falso	and	falso	falso	verdadero	indefinido
and	verdadero	falso	falso	verdadero	falso	falso	and	falso	verdadero	falso	and
and	verdadero	verdadero	verdadero	verdadero	verdadero	verdadero	and	falso	verdadero	verdadero	or
or	falso	falso	falso	falso	falso	falso	or	verdadero	falso	falso	and
or	falso	verdadero	verdadero	falso	verdadero	verdadero	or	verdadero	falso	verdadero	or
or	verdadero	falso	verdadero	verdadero	falso	verdadero	or	verdadero	verdadero	falso	indefinido
or	verdadero	verdadero	verdadero	verdadero	verdadero	verdadero	or	verdadero	verdadero	verdadero	and



La identificación proporciona dos soluciones, para la  $A=B=C=$  falso y  $A=B=C=$  valores de estado verdadero y dos soluciones indefinidas para  $A=B=$ falso,  $C=$ verdadero y  $A=B=$ verdadero,  $C=$  valor de estado falso. Todos estos muestran que las operaciones básicas de un sistema experto pueden ser rearrregladas dentro de una mayor simplicidad menos costosa que la de tecnologías conocidas.

La decisión de permanencia entre las reglas y las declaraciones "si" convencionales es una alteración del orden de ejecución basada en el orden de inferencia en respuesta a los datos que llegan.

En el soporte de la ejecución de estos sistemas expertos de reglas aisladas esta dentro de un sistema de software especializado. Donde el lenguaje de procesamiento convencional soporta solamente la secuencia y orden de ejecución del estado enlazado en un control de proceso universal efectivo que puede requerir soporte para la ejecución continua, ejecución en paralelo y ejecución del manejo de estado.

Si se puede establecer una mejor aplicación de la integración de sistemas y de las herramientas apropiadas, las reglas del sistema experto pueden hacerse en una parte directa del control de procesos normal. Como un mismo tiempo, estos requerimientos de uso general proporcionan un estándar en la programación profesional en el control de procesos. Un millar de declaraciones "si" es un embrollo cuando estos son llamados reglas o declaraciones. Si la gente de control esta usando semejantes sistemas estos deben aprender un grupo de términos dentro de un pequeño establecimiento obvio como fuente documental y nombre de la subrutina.

La mayor parte de las tareas expertas están incluidas en una u otra de las siguientes categorías:

- Diseño: que implica la especificación de un sistema u objeto, de tal forma que el sistema u objeto satisfaga algún conjunto de requerimientos dados y pueda ser construido utilizando algún conjunto dado de requisitos.
- Diagnostico: que implica encontrar fallos en un sistema, dado un conjunto de síntomas.
- Interpretación: que implica el análisis de datos para determinar su significado.



- Monitoreo: que implica el análisis continuo de señales y la puesta en marcha de acciones y/o alarmas, según proceda.
- Planeación: que implica la creación de un plan de acción para lograr un objetivo dado.

De ahí que un sistema de control consiste en la realización de las tareas de interpretación, diagnóstico, y reparación en forma secuencial. Con ello se consigue conducir o guiar un proceso o un sistema.

Entre las propiedades de los sistemas expertos se puede mencionar:

- (1) Poder para llevar desde el dominio del conocimiento por lo contrario desde técnicas de búsqueda,
- (2) Usualmente construidos con ayuda de algunos expertos humanos,
- (3) Transferencia del conocimiento que ocurre gradualmente a través de muchas interacciones (la cantidad del conocimiento depende de la labor),
- (4) El cambio de control de estructura depende de las características del sistema,
- (5) Las partes que no tienen dominio específico pueden ser extraídas de la construcción de nuevos sistemas.

Los sistemas expertos pueden escribir en un imitación del desarrollo y la habilidad aprendida de un operador humano experto en una unidad de consola. Cuando ocurre un cambio en la situación o problema, el experto humano usualmente conoce, basado en la experiencia, que acción tomar. El experto humano tiene un modelo mental del proceso que está basado sobre datos de experiencias y sucesos pasados. Después desarrolla un cierto número de labores en determinado tiempo, el experto humano intuitivamente conoce que acción tomar repasando su modelo mental. Sin embargo, cuando alguna vez ocurren nuevos sucesos o alguna acción pasada no es realizada cuando es esperada, el experto sobrepasa ese modelo mental, que es comúnmente llamado aprendizaje.

El sistema experto también tiene un modelo mental del proceso que provee las reglas básicas a seguir cuando ocurren cambios en las variables de proceso. El modelo del sistema mental también es basado en datos de experiencia y el nivel del suceso resulta de el seguimiento de las reglas. Este concepto en inteligencia artificial es llamado software automodificado. El sistema es también designado para capturar algunos de los



conocimientos de la experiencia del operador permitiendo tomar su lugar cuando el experto humano esta de vacaciones o se tiene alguna otra circunstancia, como podria ser en las areas donde existe alto riesgo para el operador humano.

El conocimiento basado en la experiencia humana (conocimiento profundo) que utiliza un sistema experto puede contener información acerca de leyes físicas fundamentales, químicas u otras ciencias. El conocimiento profundo puede ser un modelo matemático de un proceso. El sistema experto puede producir reglas adicionales y hacer inferencia para tener el conocimiento profundo dentro de un estimado. En orden de la distribución con el conocimiento profundo se requiere de grandes cantidades de memoria de computadora y tiempo de computadora. Frecuentemente estos no son utilizados a un nivel industrial significativo.

Como los sistemas expertos abordan problemas que se consideran difíciles y que requieren de experiencia. Tales sistemas son frecuentemente desarrollados como sistemas de producción en los que;

- ( a ) las reglas de producción representa el cuerpo del conocimiento experto relevante para algún dominio del problema,
- ( b ) las bases de datos contienen hechos acerca del problema particular que se esta resolviendo y
- ( c ) el interprete de reglas actúa de una manera que resulte comprensible para el usuario del sistema experto, por ejemplo, esto puede ser apropiado en algunos casos para el que el interprete de reglas resuelve el problema aplicando las reglas en el mismo orden en el que el experto humano lo haría.

Hay tres métodos utilizados generalmente para obtener el conocimiento experto empleado en un sistema experto:

\* Transcripción de textos, implica todos los problemas asociados con la comprensión del lenguaje natural.



\* Extracción de conocimientos de los expertos, implica tantear más que fundamentar. Se encuentran dificultades cuando se considera que los expertos poseen porciones de conocimiento que pueden ser fundamentados solicitándoles que escriban las reglas que los representen.

\* Introducción a partir de ejemplos, semejante sistema soluciona problemas complejos por búsqueda de un caso base para encontrar una solución para el problema similar y este modifica si conviene el criterio de le nuevo problema.

Una arquitectura típica de un sistema experto es mostrada en la figura . Los componentes mayores son la base de datos global, la base de conocimiento, estructura de control y uso de interfase.

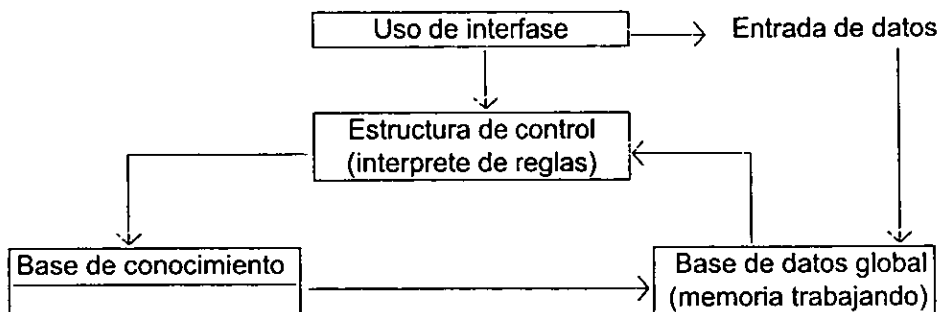


Fig. 7.4. Estructura de un sistema experto.

- La base de datos global es el dato principal de la estructura del sistema experto. Los rangos de la base de datos desde un lista simple o una pequeña matriz sobre un complejo, una relación, índice de la estructura de la fila. Si la estructura es dinamica cambia continuamente como un resultado de la operación de las reglas de producción. La base de datos también llamar como una memoria de trabajo.
- La base de conocimiento es el origen de la base de conocimiento dentro del sistema experto, y esta incluye el dominio de las reglas heurísticas específicas para resolver el problema en ese dominio. Estos son generalmente estructurados en forma de reglas de producción. La producción de reglas tiene una parte condicional "si" llamada la parte izquierda del manejo y la parte de acción "entonces" conocida como la parte de manejo derecho. Si la parte de manejo izquierdo algunas veces llamado la acción o premisa, es satisfecha por la base de datos, las reglas



son aplicadas y a la existencia de la descarga por el sistema de control. La condición y la parte de acción de las reglas de producción puede contener los predictores lógicos AND y OR, ejemplo:

Regla 1: Si (errar un dato AND la novia esta furiosa y no puede recurrir a llamarla por telefono) entonces (comprar rosas y hacer una reservacion en el ballet)

Regla 2: Si (la hoja es parda esta seca) entonces(rociar la planta).

La labor de codificación de las reglas heurísticas obtenidas desde un experto humano es referido por el conocimiento de ingeniería.

- El sistema de control es esencialmente un interpretador de programa para controlar el orden en donde las reglas de producción son descargadas y resuelven conflictos si mas de una de esas reglas es aplicable. El sistema de control repetidamente aplica reglas para la base de datos solamente una descripción del estado global es producido, si entonces se detecta la ocurrencia de semejante estado conseguido y graba la regla cuando tiene que ser aplicado para alguna tendencia o como referencia posterior.
- El uso de interfase puede variar desde un simple menu de manejo I/O par la sofisticacion del lenguaje natural del diagnostico y comandos.

INTERFASE HUMANA PARA SISTEMAS EXPERTOS. Constituye un tema en si mismo. Técnicas y nociones relevantes de ciencia cognoscitiva, comprensión del lenguaje natural, ingeniería del conocimiento y tecnología de datos se integran y relacionan colectivamente utilizando términos tales como "interface hombre - máquina".

La credibilidad del sistema experto depende, hasta cierto punto, de su habilidad para explicar su razonamiento. Los medios empleados para la explicación deberan utilizarse también para fines de enseñanza y para depurar el sistema.





Es importante diferenciar entre los diversos papeles que puede jugar un sistema experto:

- (A) El sistema experto es considerado como "esclavo" del usuario humano. En este caso, el sistema experto realiza tareas mundanas bajo el control del usuario,
- (B) El experto es considerado como el "controlador" y el usuario como el esclavo. Por ejemplo, el usuario suministra resultados de la forma requerida por el sistema y el sistema experto toma las decisiones importantes, que después son puestas en práctica por el usuario y
- (C) El sistema experto es considerado como "colega" del usuario; por ejemplo como consultor médico. Este papel es por mucho el más difícil de conseguir. El sistema experto debe ser capaz de simpatizar con el usuario constituyendo posiblemente algún modelo del conocimiento del usuario, capacidades, etc.

Casi todas las tareas expertas necesitan grandes espacios de búsqueda, la mayoría implican razonamiento con conocimiento incierto, y algunas emplean razonamiento con datos que varían en el tiempo.

En muchos de los campos en los que se aplican los sistemas expertos, el conocimiento disponible puede ser no confiable, impreciso, incompleto, vago y/o inconsistente. Se han desarrollado varias metodologías para razonar con tal conocimiento, por ejemplo:

- teoría de la probabilidad.
- teoría de la certidumbre.
- la teoría de Dempster-Schafer de la evidencia.
- teoría de la posibilidad / lógica difusa.
- cálculo de la incidencia.
- teoría de la plausibilidad.



Los sistemas expertos están siendo usados en una variedad de aplicaciones dirigidas a la planta productiva. Una área clave de la aplicación es en el diagnóstico y reparación de equipos. Esta área puede ser dividida en dos subcategorías: reparación de equipo y compostura en línea.

El pequeño tamaño del medio del sistema experto puede ser desarrollado para computadoras de oficina que proporcionen la dirección de la reparación de piezas complejas de los equipos. Un sistema de este tipo puede ser designado por un ingeniero de mantenimiento de la planta usando la técnica experimentada de la especificación de la manufactura de los servicios representativos.

Este acercamiento es un costo efectivo en ese uso relativamente barato del hardware de computadora y de fácil desarrollo en la base de conocimiento del estrecho dominio del experto.

Los beneficios logrados de esta aproximación son dobles: *primero*, la productividad de la técnica de mantenimiento es mejorada para hacer un experto disponible durante todas las fases de la reparación. Esta capacidad de la técnica tiene un mayor control sobre la reparación, mientras que proporciona una experiencia de aprendizaje por interactuar con la base de conocimientos.

El *otro beneficio* es que aquel sistema experto es desarrollado, si puede ser distribuido ampliamente a otros departamentos. Esto puede apoyar la eficiencia de el staff de ingenieros.

Estos mejoramientos también pueden justificar el costo del entrenamiento avanzado de los ingenieros de mantenimiento ya que el conocimiento puede ser capturado y diseminarse a través de la organización vía sistemas de base de conocimientos.

Idealmente, la base de conocimientos puede mejorarse continuamente gracias a las entradas de técnicas de mantenimiento como las usadas por los sistemas expertos y obtener un conocimiento adicional a través de esas experiencias propias. Esa evolución del conocimiento es



mostrada por el mantenimiento de si mismo y la eliminación de la necesidad de que el ingeniero proporcione continuamente mantenimiento al sistema.

La compostura en línea es particularmente valiosa para sistemas de control complejos. Aunque es más difícil y consume tiempo de desarrollo en la designación de un sistema experto para la especificación de un hardware de reparación. Esto puede ser comparado con los costos efectivos de la perdida de tiempo de producción generalmente encontrados en sistemas de control fuera de línea. El malfuncionamiento de los sistemas de control de proceso generalmente resulta en una o dos condiciones:

- 1.-El sistema decae y para, resultando costoso por una labor improductiva y perdida de la ganancia, o
- 2.- El componente del sistema de experiencia intermitente falla porque la indeterminación es integrada y guía a un pobre control, que puede dar por resultado una baja calidad o igualmente una operación en condiciones peligrosas.

Cada escenario puede justificar el tiempo y gastos para desarrollar un sistema experto que asista a el ingeniero o ataque técnicamente en los diagnósticos o reparación del problema tan completamente como sea posible. Involucrado por el entrenamiento del personal de servicio probablemente puede ser extendido durante el desarrollo de la fase, desarrollado el sistema puede ser distribuido fácilmente por operaciones similares dentro de la planta.

Otra aplicación en el área es el análisis de alarma. Un sistema experto puede ser designado para el monitoreo del proceso en tiempo real, interpretar las condiciones de alarma, y alertar al operador de las posibles correcciones o acciones a realizar. Esta idea puede ser extendida en un sistema de tiempo real designado para coleccionar datos del producto, calculo de la tendencia estadística, y proporcionar una interpretación. Semejante sistema puede capacitar a un control de proceso proactivo para alertar al operador de la tendencia estadística en las variables claves del proceso antes de que ocurra un disturbio en el sistema.



Si los sistemas expertos son aquellos que pueden abordar problemas que se consideran difíciles y que requieren experiencia. Tales sistemas son frecuentemente desarrollados como sistemas de producción en los que:

- a) Las reglas de producción representan el cuerpo de conocimiento experto relevante para algún dominio del problema; por ejemplo, diagnóstico médico.
- b) La base de datos contiene hechos acerca del problema particular que se está resolviendo; por ejemplo, los síntomas y resultados de ensayos para un determinado paciente.
- c) El interprete de reglas actúa de una manera que resulte comprensible para el usuario del sistema experto; por ejemplo, esto puede ser apropiado en algunos casos para que el interprete de reglas resuelva el problema aplicando las reglas en el mismo orden en el que un experto humano lo haría.

Si se observan algunas de las aplicaciones industriales como son:

- Diagnóstico de control de calidad,
- Detección y actuación en caso de alarma y emergencias,
- Configuración de equipos y sistemas bajo demanda. El problema que surge es el gran número de configuraciones posibles y las interacciones que hay que considerar para cada uno de los componentes.

Este tipo de tareas es **compleja** ( el número de combinaciones posibles es elevado, no siendo todas ellas factibles, existencia de múltiples relaciones, limitaciones, especificaciones del cliente a veces contradictorias o incompletas, especificaciones de los componentes), **cara** (por la complejidad y tiempo requerido en el diseño y la comprobación del mismo) y el **conocimiento se incrementa** (aparición de nuevos componentes o variación de las especificaciones de los mismos).

La problemática de los sistemas expertos se centra en la necesidad de que los sistemas expertos se comuniquen con dispositivos sensores, bases de datos, dispositivos de mando y accionadores, etc., y todo ello en tiempo real.



Como ya se menciona de los distintos tipos de sistemas expertos los mas empleados en la industria son los de diagnostico y reparación de averías tanto de productos como de maquinarias, por las siguientes razones:

- Los equipos y productos tienen una complejidad creciente.
- Los sistemas industriales se diseñan en la gran mayoría de las veces a prueba de fallas, lo que impide que aparezcan dos veces la misma falla.
- Las reparaciones deben realizarse sin interrumpir el servicio o en el menor tiempo posible, por las pérdidas que genera la inactividad.
- La presencia cada vez mayor de equipos específicos creados bajo demanda, lo que dificulta su mantenimiento y reparaciones.

Un problema clave en el desarrollo de sistemas expertos de consulta es encontrar la forma de representar y usar el conocimiento de el experto humano que en esa materia posee y usan. Este problema se hace mas difícil por el hecho de que en muchos campos, el conocimiento de los expertos es a menudo impreciso, dudoso e anecdótico (aunque los expertos humanos usan este tipo de conocimientos para llegar a conclusiones útiles).

La lista de pros y contras es seguramente extensa, pero los argumentos mas esenciales y los argumentos opuestos pueden ser resumidos como siguen:

<b>Los beneficios de los sistemas expertos son:</b>
◆ posible extensión de la capacidad de sus conocimientos base.
◆ capacidad continua de almacenamiento, revisión de conocimiento y adquisición de conocimiento nuevo.
◆ potencial de mejoramiento de si mismo, de almacenamiento del conocimiento del sistema a través de inferencia del conocimiento base y aprendizaje del proceso.
◆ automatización, control del conocimiento para resolver problemas usando simples métodos de razonamiento.
◆ posibilidad de la construcción de prototipos rápidos y la construcción de computadoras de colaboración y revisión.
◆ uso de modelos iterativos favorables para la operación en donde el componente explicativo útil esta incluido.



Las principales deficiencias de sistemas expertos y los obstáculos en los caminos de su edificación son:

<b>Las deficiencias de los sistemas expertos son:</b>
▲ representación del conocimiento del campo conceptual y conocimiento profundo adquirido en el campo del problema, son dos labores cruciales de desarrollo del sistema.
▲ requerimientos de disponibilidad de términos extensos de un campo o dominio expertos para la adquisición de conocimientos, consecuentemente la evaluación y la verificación del sistema.
▲ costoso, si no imposible, aprovisionamiento de programas para acción, explicación conceptual de soluciones que, por instantes en un sistema de diagnóstico, no solamente incluyen cuando la edición del diagnóstico fue elaborado solo por ser de ese modo establecido.
▲ falta de unificación o estandarización de sistemas que contribuyen individualmente al sistema en conceptos y estructuras, hechos difícilmente por un sistema existente a ser desarrollados por algún programa que no se involucra en su generación original.
▲ uso circunstancial del sistema por no programación, igual campo de expertos, debido a la deficiencia de asignaciones, lenguaje natural orientado a la interferencia humana.
▲ consumo de tiempo y costosa validación de sistemas en el campo o dominio bajo circunstancias normales.

A pesar de lo inadecuado de los sistemas expertos esto es conclusión de la práctica y nuevas ocupaciones del área de la inteligencia artificial. Si es casi imposible enumerar los sistemas expertos que son construidos alrededor del mundo se tiene que los sistemas expertos disponibles comercialmente son desarrollados enormemente. El campo de los problemas es muy amplio y se incluyen actividades como :

1. sistema de diagnóstico con base de datos o símbolo,
2. predictor básico de situaciones y/o eventos,



3. generación de un plan directo a la meta u objetivo,
4. monitoreo de sistema de base de instrumentación,
5. control de sistema de base de instrumentación,
6. designación de sistema soporte de computadora,
7. sistema de reparación basado en fallas y reconversión,
8. soporte de programas inteligentes, soporte de decisiones y consultoria,
9. instructor de programas y educación,
10. simulación de sistemas de base de conocimientos.
11. permite la instalación en plantas donde el personal corre riesgos por el tipo de proceso que en ésta se realiza.



## **CAPITULO 8.            REDES                                   NEURALES.**

El conocimiento que un ser humano retiene en su cabeza se codifica en algún lugar de su sistema nervioso. Posiblemente, se almacena en redes neuronales que implican conexiones sinápticas de conductividades electroquímicas variables, una especie de circuitos programados cuya estructura y función pueden modificarse a través de la experiencia. No se conoce la filosofía exacta de ello. Sin embargo, estudios han mostrado que, durante los últimos 30 000 años ha habido poco cambio en la memoria y poder de procesamiento mental de los seres humanos.

Sin embargo, durante este tiempo ha habido un marcado aumento en la habilidad de la humanidad para almacenar y procesar conocimiento. Esto se debe en gran medida al progreso de técnicas para la comunicación de conocimiento, junto con el desarrollo de métodos para el procesamiento mecanista del desarrollo.

Generalmente, el desarrollo de un modelo teórico de un proceso complejo requiere mucho tiempo y esfuerzo para determinar la propiedad del algoritmo. Desafortunadamente, muchos procesos tienen un alto grado de variables que interaccionan, además de que el modelo verdadero para esto tal vez nunca podrá ser desarrollado con los requerimientos necesarios. Las redes neurales proporcionan una aproximación diferente sobre esto y son capaces de reorganizar el diseño dentro de esas variables a través de un entrenamiento-aprendizaje del proceso por exponer los datos de entrada y de salida.





La tecnología de las redes neurales viene desde los estudios ordinarios del cerebro de los mamíferos, particularmente de la corteza cerebral. La imitación de las redes neurales sobre el camino que una capa del cerebro humano plantearía para la información incompleta y confusa dada acerca de algún suceso.

El procesamiento de información de la RN (Red Neural) inspirado en el envío de sistemas nerviosos biológicos (semejantes al cerebro) para procesos de información tiene como aplicaciones: diseño de reconocimientos, modelado, pronóstico y decisiones. Entre sus propiedades se pueden mencionar: (i) sistemas de fuerte interconexión en procedimientos donde la capacidad de procesamiento es almacenada en las conexiones cargadas que son obtenidas para un proceso de adaptación y aprendizaje, (ii) manejo de datos según los sistemas construidos, (iii) aprendizaje por ejemplos, y (iv) sucesión o entrenamiento no programado para una aplicación.

Las redes neurales pueden identificar o aprender patrones correlativos entre datos de entrada establecidos y los valores objetivos correspondientes. Una vez que se entrenan, semejantes redes pueden ser usadas para pronosticar predictivamente los resultados desde nuevos datos alimentados.

Para explicar de una manera simple el desarrollo de una RN considere como un niño aprende para identificar formas y colores usando un juguete consistente de diferentes formas sólidas ( triángulos, cuadrados, círculos y otros mas ) y los colores para ser insertados dentro del armazón que posee espacios vacíos que corresponden a dichas formas solamente mediante la correspondencia de dichas figuras y colores respectivos. El niño aprende por ensayo y error acerca de las figuras y los colores después de repetidas veces hasta que acierta en colocar el objeto sólido en el hueco o espacio que le corresponde.

Eventualmente, las figuras y colores son reorganizados y el niño dispone del objeto en los espacios para la inspección visual. Similarmente las redes neurales aprenden por repetir ensayos de las replicas de colocar o instalar datos de entrada para el correspondiente valor de salida-objetivo.



Después de un número suficiente de interacciones de aprendizaje, la red crea un modelo interno que puede ser usado para predecir las nuevas condiciones de entrada. Justamente como un niño aprende eventualmente a identificar formas y colores, la red neural reorganiza los patrones de corrección entre las entradas y las salidas para el proceso correspondiente.

El aprendizaje en redes neurales puede ser supervisado o sin supervisión. El intento de *aprendizaje supervisado* es donde la red tiene alguna información presente durante el aprendizaje o entrenamiento para decir cuando aparece o surge la respuesta correcta. La red entonces tiene un camino para hallar cuando fue o no la entrada correcta y cuando el conocimiento es aplicado para una fase de conocimiento particular que puede ser justificado en sí mismo. Esto es análogo a el proceso de aprendizaje de un niño en la reorganización de las diferentes formas y colores de los objetos.

En contraste con esto, el intento de *aprendizaje sin supervisión* no tiene el conocimiento de si la respuesta es correcta y de ese modo no puede conocer exactamente cuando la salida correcta ha sido mostrada. Considere, por un instante, que un bebé aprende por enfocar con sus ojos. Esta destreza no es conocida por el recién nacido, pero es adquirida después de cumplir años. Dentro de algunos días, el bebé va aprendiendo con poca o ninguna ayuda a asociar lo establecido por una estimulación visual con objetos y colores. La red neural sin supervisión opera análogamente, por el aprendizaje con poco o ninguna información acerca de la respuesta correcta de la salida del diseño.

Estas dos clases de aprendizaje son importantes para aplicaciones diferentes, para casi todos los problemas de ingeniería química la supervisión con aprendizaje es suficiente.

Las redes neurales pueden entender complejas relaciones no-lineales siempre que la información de entrada sea amplia. Las redes neurales pueden hacer fuerte el avance en el área de reconocimiento de habla continua y de síntesis, reconocimiento de diseños, clasificación de datos imprecisos, detección de rasgos no lineales y modelos de procesamiento. Estas habilidades hacen a la tecnología de red neural un profundo proceso para la solución de problemas en los procesos químicos industriales.



Las redes neurales tienen un número de propiedades que las hacen ventajosas sobre otras técnicas computacionales, como se describen aquí:

- La información es distribuida sobre un campo de nodos. Esto propicia una gran flexibilidad de este procesamiento simbólico, donde la información es sujeta sobre una localización fija.
- La RN tiene la habilidad de aprendizaje. Si un error o una situación nueva ocurre esto crea un resultado del sistema inadecuado o inexacto, se puede usar la programación hacia atrás o hacia adelante para corregir esto. Ajustando la fuerza de señales emitida desde los nodos únicamente el error desaparece. Típicamente el sistema es incierto cuando es una fase en una situación nueva. El programa debe desarrollar un nuevo establecimiento de reglas de corrección de la situación. Consecuentemente, usando un sistema que tiene la habilidad de un aprendizaje mejorando significativamente el acercamiento.
- La RN permite extender el índice de conocimientos. El índice de conocimientos es una habilidad de almacenamiento de una gran cantidad de información y acceso en un simple manejo. En una programación simbólica usando las reglas de conocimiento base, el índice de conocimiento puede ser poco diestro. La información puede no ser fácilmente accesible y una gran cantidad de tiempo puede desecharse para recuperar esa información. Por esa razón, en sistemas simbólicos se utiliza un sistema de fabricación-base donde la extensión del índice de reconocimiento es requerida. Una RN proporciona un inherente índice de conocimiento, se puede llamar, por ejemplo, diversas cantidades de información asociada con un nombre químico, un proceso, o el establecimiento de las condiciones de proceso. El conocimiento es retenido en la red por vía de dos medios: (1) las correcciones entre nodos y (2) el peso o carga de estas conexiones. Debido a esto muchas interconexiones en las RN pueden indicar y recibir una gran cantidad de información correspondiente a las interconexiones entre las variables.
- Una RN puede procesar mejor para procesos con ruido, incompletos, o de datos inconsistentes. Un simple nodo con una RN no es directamente responsable de asociar ciertas entradas con una cierta salida. Instalando cada nodo en códigos de unos microrasgos del patrón de entrada/salida. El concepto de microrasgos implica que cada nodo efectúe el patrón de entrada/salida en pequeño. Solamente cuando se ensamblan todos los nodos dentro de una simple red que coordina, pueden estos microrasgos mapear o



dibujar la macroscopia de diseño de entrada/salida. Otra técnica computacional que no incluye el concepto de microrasgos es un modelado empírico, por instantes, casi todos los modelos confían fuertemente sobre el uso de variables. Consecuentemente si el valor de una variable esta fuera, entonces el modelo puede producir resultados inexactos. Con el concepto de microrasgos, sin embargo, si el valor de una variable esta fuera el modelo puede no ser afectado substancialmente. En resumen, para un concepto de microrasgos de una RN los signos envían para y desde nodos que son funciones continuas. Consecuentemente la RN puede deducir conclusiones de las propiedades, igual desde datos con ruido, incompletos o inconsistentes de las señales de entrada.

- La RN imita el proceso de aprendizaje humano. Casi todos los humanos aprenden y resuelven problemas existentes por ensayo y error. Por ejemplo, si una pieza de equipo no opera correctamente, se observan los síntomas y recomendaciones de las acciones correctivas. Basados en el resultado de esta acción, se recomiendan acciones adicionales.

Este proceso continuamente empleado propiamente correlaciona los síntomas de las acciones correctivas y la maquina opera correctamente. Las RN operan del mismo modo, pueden entrenar esto por iteraciones ajustando la fuerza de las conexiones entre los nodos. Después de numerosos ajustes iterativos, la RN puede proporcionar la predicción de una relación causa efecto.

Robert Hecht-Nielsen define una red neural como: "un sistema de computadora hecho sobre un numero de simples elementos de procesamiento altamente interconectados donde la información de procesamiento da la respuesta en estado dinámico de una entrada externa".

La red neural es una arquitectura de un programa de computadora para computación no-lineal que consiste en un arreglo de bloques individuales llamados elementos de procesamiento (neuronas), estos están fuertemente interconectados.



Estos elementos son estructurados en una forma que indeterminadamente asemejen la basta y complicada red de neuronas biológicas. Una neurona se establece como un elemento de procesamiento individual que puede tener algún número de entradas simples y solamente una salida. Generalmente la salida del elemento es relacionado con la entrada por una función de transferencia.

El grado con el que un elemento de procesamiento relaciona a otro esta en función de esa fuerte conexión que es multiplicada por la entrada correspondiente. Esa carga o desgaste de la conexión es modificada a través de un proceso de aprendizaje que tiene la red si la única habilidad es la relación de los modelos complejos en datos de proceso.

El cuerpo del elemento de proceso de los productos de entrada y las cargas del vector tiene que ser comparada con el umbral del nivel interno por medio de una función de transferencia. Los elementos de procesamiento son agrupados dentro de un arreglo lineal llamados capas, que consiste de una capa de entrada, una capa intermedia u oculta y una capa de salida.

El arreglo es alimentado con las entradas a la red en forma de vectores de entrada, y la correspondencia a las salidas desde la red hasta los vectores de salida. La arquitectura de la red neural es especificada por las características del nodo, la topología de la red y el o los procedimientos de aprendizaje.

También se les llama arquitectura conexionista, procesamiento paralelo distribuido, y sistemas neuromórficos, una red neural (RN) es un paradigma para el proceso de información, inspirado por la manera en que las estructuras del cerebro de los mamíferos están interconectados densamente para procesar la información.

Las redes neurales son colecciones de modelos matemáticos que imitan algunas de las propiedades que se han observado en los sistemas nerviosos biológicos y toman las anomalías del aprendizaje biológico adaptativo.



El elemento clave de un paradigma de RN es la nueva estructura del sistema de procesamiento de información. Éste está compuesto de un gran número de elementos de procesamiento altamente interconectados, los cuales son análogos a las neuronas y están atados a conexiones pesadas que son análogas a las sinapsis.

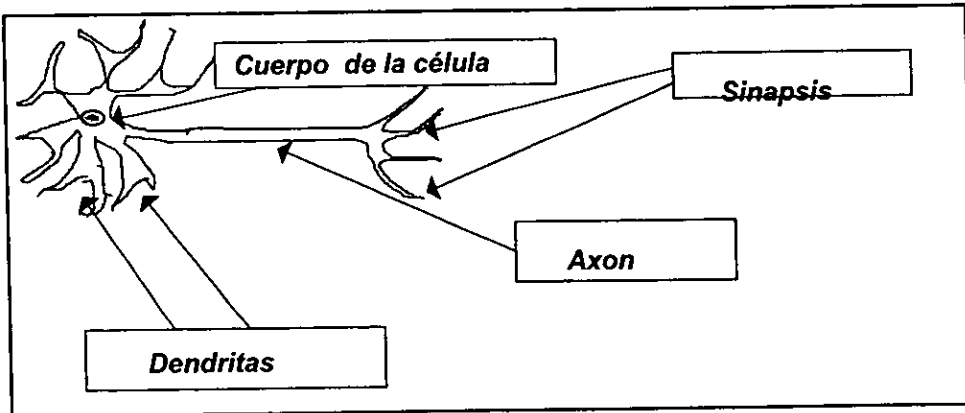


Fig. 8.1. La analogía con las partes de una neurona biológica.

El aprendizaje en sistemas biológicos requiere ajustes al sistema sináptico de conexiones que se encuentran en las neuronas. Esto es igual a las RNs. El aprendizaje sucede típicamente a través de ejemplos y adiestramientos, o a través del uso de un grupo verificado de datos de entrada y salida donde el algoritmo de entrenamiento se ajusta esporádicamente al peso de las conexiones (sinapsis). El peso de las conexiones almacenan los conocimientos necesarios para solucionar problemas específicos.

Aunque las RNs han existido desde la década de los 50's, no fue hasta mediados de los 80's que los algoritmos fueron lo suficientemente sofisticados para uso general. Hoy en día, los RNs se usan para un número creciente de problemas reales de gran complejidad.

Las RN sirven de mecanismos para reconocer patrones y son clasificadores robustos, con la habilidad de generalizar la toma de datos dispersos. Ofrecen soluciones ideales para una gran variedad de problemas de clasificación tales como el habla, el reconocimiento de caracteres y señales, tanto como predicciones funcionales como modelos de sistemas donde los procesos físicos no son comprendidos o son altamente complejos.



Las RNs también pueden ser usados para problemas de control, donde los datos de las variables son medidos para derivar un verificador de resultados, y la red aprende la función de control.

Hay una gran cantidad de tipos distintos de RNs. Algunas de los más conocidos incluyen el perceptron de capas múltiples, el cual está calibrado con el algoritmo para la anteprogramación de errores, cuantificación del vector (ángulo) de aprendizaje y la función de la base radial. Algunas RNs han sido clasificadas como suplidores de avanzada, mientras que otros son recurrentes (proveen insumo) dependiendo de como se procesa la información a través de la red. Otra manera de clasificar los tipos de RNs es por su método de aprender (o adiestrar), pues algunas RN usan adiestramiento supervisado, mientras que a otras se les llama "sin supervisión" o "auto organizadas". Como antes se mencionó el adiestramiento supervisado es análogo a un estudiante guiado por un instructor. Los algoritmos sin supervisión esencialmente llevan a cabo la agrupación de los datos en grupos similares basados en los atributos medidos o características que sirven de insumo a los algoritmos. Esto es análogo a un estudiante que deriva la lección totalmente por su cuenta. Las RNs pueden ser implementadas en software o en equipo especializado.

Para operar una RN se debe ir a través de tres fases:

- La fase de entrenamiento o aprendizaje
- La fase de revocación o llamada
- La fase de generalización

En la fase de entrenamiento o aprendizaje, repetidamente se presenta un patrón de entrada-salida de la RN. Ajustando el peso de todas las conexiones entre nodos únicamente especificando las entradas para producir las salidas deseadas. A través de estas actividades, la RN aprende la corrección de entrada-salida del comportamiento de la respuesta.

Después de la fase de entrenamiento, se pasa a la revocación y fase de generalización. En el desarrollo de la RN, la fase de entrenamiento es típicamente la más larga y la que consume más tiempo. En la fase de llamada o revocación se ajusta la RN en un orden amplio del diseño de entradas observado en entrenamiento, y se introduce un ajuste para hacer al sistema más real y firme. Durante la fase de generación se sujeta a la RN en un patrón de entradas nuevo donde el sistema se desarrolla propiamente.



La fase de entrenamiento es crítica para los sucesos de la RN. Se usa la propagación (back) hacia atrás en ese estado para la corrección del error. La propagación hacia atrás, es una técnica intensamente numérica y se tienen diferentes caminos para desarrollar ésta propagación para aprender cual será la respuesta o como responderá la RN. El desarrollo de las matemáticas, estadística, ciencia de la computadora y la ingeniería tiene todos los algoritmos generalmente para la completa programación matemática para la propagación hacia atrás. Básicamente, casi todas las formas de ésta propagación tienen los siguientes pasos:

1. Introducir una entrada específica y medir la salida actual.
2. Comparar la salida actual con la salida deseada; calcular el error cuantitativamente basado en el análisis entrada-salida.
3. Minimizar iterativamente el error (o el promedio del cuadrado del error) para ajustar las estrechas correlaciones entre los nodos:
  - a) comenzar con la salida de nodos y ajustar estos pesos.
  - b) propagar hacia atrás para las fases adyacentes a la fase de salida. Calcular el error en esas fases y ajustar esos pesos.
  - c) continuar esa propagación hacia atrás (desde el lado de la salida de la red hacia el lado de la entrada), únicamente todos los errores son calculados y los pesos son ajustados.

Una matemática intensa se tiene en los tres pasos, donde se tiene que calcular el error, y ajustar las conexiones intensas.

**TOPOLOGÍA DE RED NEURAL.** La topología se refiere a cuantas neuronas están interconectadas. La estructura de una red neural constituye la base para el almacenamiento de la información y gobierna el proceso de aprendizaje. Las redes neurales están constituidas por neuronas (neurdos o simplemente nodos) interconectadas. Una neurona es una entidad capaz de recibir y enviar señales, y es simulada en el ordenador por medio de cálculos matemáticos, fig. 8.2.



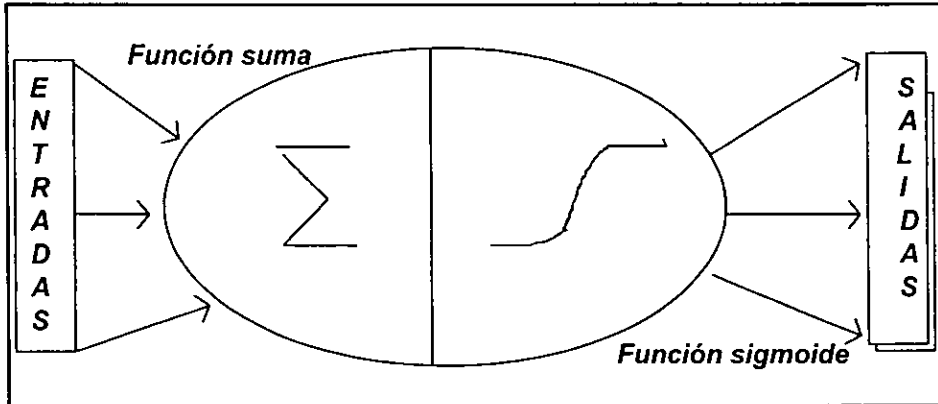


Fig. 8.2. Esquema de una neurona.

Asociada a cada una de las conexiones entre las neuronas existe un factor de peso en el que se "contiene la información". Estos factores, junto con la estructura de la red constituye el modelo generado por la red neural.

La forma de esta topología o arquitectura para la organización de las neuronas en la fase, conexiones y peso de las interconexiones. (A) Conexiones inibidoras o excitadoras; las conexiones pueden inhibir o excitar el nodo. Si la carga es positiva, si permite la excitación del nodo incrementándose la activación de la neurona.

Si la señal es negativa, se puede inhibir el nodo, decrementando la activación de la neurona. Si la señal es altamente inibidora, puede bajarse la entrada mas allá del nivel umbral y cerrar el nodo hacia abajo. (B) Opción de conexiones. Tenemos tres opciones de conexiones de entrada como se muestra en la fig. 8.3. En las conexiones interfaces, la salida del nodo alimenta otro nodo de la misma fase. En las conexiones interfaces, la salida de un nodo en una fase alimenta otro nodo de otra fase. Finalmente, en las conexiones recurrentes, la salida de un nodo alimenta dentro de si mismo.

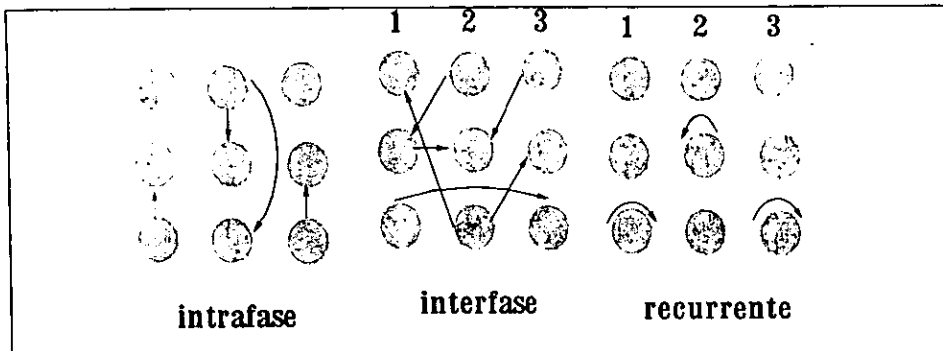
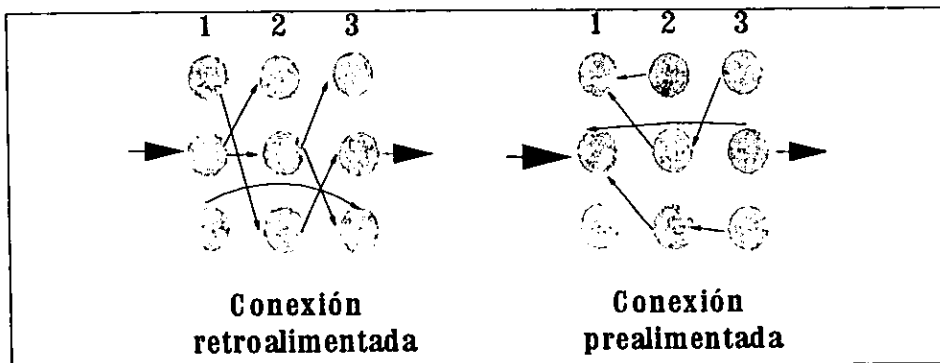


fig. 8.3 Opción de conexiones en una red neural.

Generalmente, para construir una red neural se pre-especifica la topología o arquitectura. Esto es, especificar las interconexiones, pero dejar el valor numérico de las cargas sobre las fases de entrenamiento. La conexión de interfaces es particularmente importante para las aplicaciones de ingeniería. Dentro del esquema de conexión de interfaces se tienen dos opciones:



(1) Conexión de retroalimentación(feedback) (2) Conexión prealimentada( feedforward)

El tipo de problemas es difícilmente resuelto determinando que topología o arquitectura es favorable. Por ejemplo, si desarrollamos una RN que debe adiestrarse en si misma, se podrá utilizar una conexión feedback. En contraste, dentro del modelado dinámico de un reactor químico entrenamos con un diseño de una respuesta de salida basada en una señal de entrada, sin embargo algunas veces se favorece la conexión feedforward.



Esto es un límite disponible de la teoría matemática rigurosa para entrenamiento RN. Casi todas las aproximaciones están basadas en redes feedforward por estar más aplicadas a ciencia e ingeniería.

Una de las estructuras neuronales más utilizadas en la actualidad es la denominada Perceptrón Multicapa, con funciones de transferencia no lineales y aplicación para el autoaprendizaje del algoritmo de retropropagación generalizado (error back-propagation).

Este tipo de red tiene un flujo de información hacia adelante en el modo de predicción y corrección del error hacia atrás (retropropagación) en el modo de aprendizaje.

Estas redes se organizan en capas. Las conexiones se establecen entre las neuronas de las capas adyacentes: una neurona se conecta de forma que recibe señales de cada una de las neuronas de la capa inmediatamente anterior y la transmite a todas y cada una de las neuronas de la capa posterior. Se requiere un mínimo de tres capas:

- Una capa de entrada que, como su nombre lo indica, recibe la entrada. Recibe la información de una fuente externa, y pasa esta información dentro del procesamiento de la RN.
  
- Una o más capas intermedias, denominadas ocultas (hidden) ya que están aisladas tanto de las entradas como de las salidas. Recibe la información de la fase de entrada y "silenciosamente" realiza toda la información de procesamiento. El paso de procesamiento entero está oculto a la vista.
  
- Y una capa de salida que comunica los resultados al exterior. Recibe la información procesada desde la RN, y establece la salida de resultados para un receptor externo.

En el proceso de aprendizaje (o entrenamiento) se presentan a la red una serie de valores con sus correspondientes datos de entrada y salida. La red identifica y establece correlaciones entre estos. Los datos sin relaciones o aleatorios no finalizarán en aprendizaje.



Así pues, cada neurona:

- Recibe señales de otra neurona,
- Suma estas señales,
- Transforma esta suma por medio de una función sigmoide que, desde el punto de vista matemático, debe ser monotonica, diferenciable y acotada,
- Envía el resultado a las otras neuronas.

*EL PROCESO DE APRENDIZAJE.* Una red neural esta formada de algunos elementos de procesamiento interconectado o neuronas, como se ilustra en la figura 8.4. Cada elemento de procesamiento recibe un numero de entradas  $X_i$  que tiene asociado un peso  $W_i$ . Desde el peso o carga total de entrada, el elemento de proceso calcula una señal de salida simple  $Y$ .

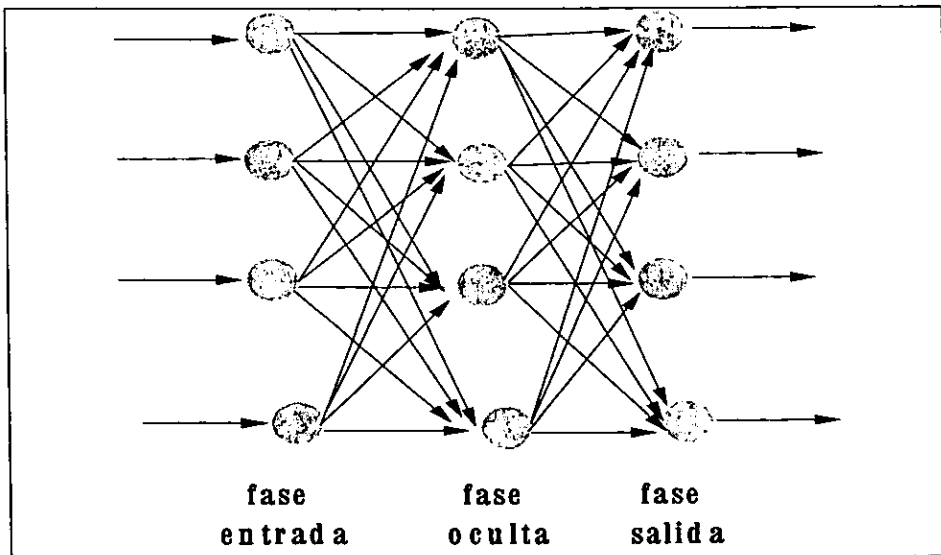


fig. 8.4. Conexión típica de una red neural.

Lo fundamental de una red neuronal es la neurona o nodo (algunas veces llamada neurona). En casi todas las ciencias y aplicaciones de la ingeniería este nodo es llamado elemento de procesamiento. Los elementos de procesamiento son los que se encuentran dentro de la red cuando casi todos los cálculos son desarrollados.



A) Entradas o salidas, el primer elemento en el  $j$ -ésimo elemento de procesamiento es el vector de entrada  $\underline{a}$  con componentes  $a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n$ . El nodo manipula esas entradas o actividades que tiene la salida  $b_j$ . Esa salida puede ser parte de la entrada de otro elemento de procesamiento.

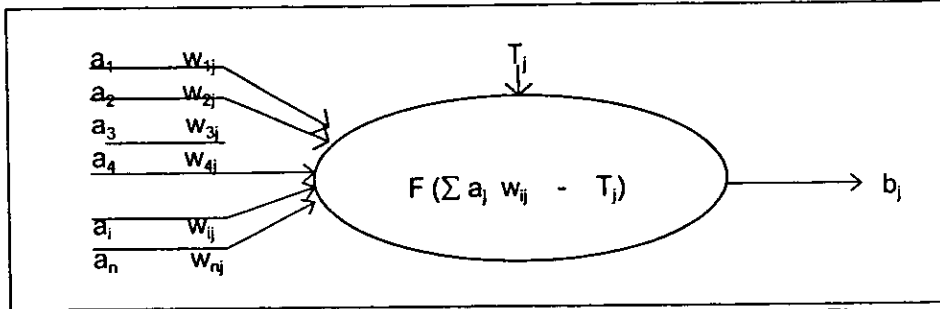


fig. 8.5. Anatomía del  $j$ -ésimo elemento de procesamiento (PE).

B) Factor de peso o carga. Los valores del componente de un vector  $\underline{a}$  tiene un efecto. Sin embargo, algunos componentes adicionales del elemento de procesamiento también afectan a  $b_j$ . Uno de dichos componentes es el factor de peso,  $w_{ij}$ , para la  $i$ -ésima entrada  $a_i$  correspondiente al nodo  $j$ -ésimo. Cada entrada es multiplicada por el factor de peso correspondiente. Por ejemplo, después de considerar el sexto elemento de proceso. La primera entrada dentro de elemento es  $a_1$ , multiplicando esa entrada por el correspondiente factor de peso para obtener  $a_1 w_{1j}$ . El elemento de proceso usa esa entrada de peso para desarrollar futuros cálculos.

Frecuentemente, el factor de peso puede tener un efecto inhibitor o excitador. Si ajustamos  $w_{ij}$  como  $a_i w_{ij}$  es positivo ( preferentemente es extenso ) para servir a la excitación del elemento de procesamiento. Si  $a_i w_{ij}$  es negativo, si el nodo es inhibitor. Finalmente si  $a_i w_{ij}$  es muy pequeño en magnitud relativa a otras señales se puede tener un pequeño o ningún efecto en el nodo.

C) El umbral sensitivo interno, el umbral interno para el  $j$ -ésimo elemento de procesamiento, denotado como  $T_j$ , controla la activación del nodo. El nodo calcula toda la suma de  $a_i w_{ij}$  de los términos al mismo tiempo y estos calculan la activación total para sustracción del valor del umbral interno:

$$\text{activación total: } \sum_{i=1}^n (w_{ij} / a_i) - T_j$$



Si  $T_j$  es extenso y positivo, el nodo tiene un alto umbral interno, con inhibidores de nodo de descarga o disparo. Consecuentemente, si  $T_j$  es cero (o negativo en algunos casos) el nodo tiene un bajo umbral interno y sus valores bajos de  $T_j$  de nodos excitados de disparo. Cualquiera peso no necesariamente todos, los elementos de procesamiento pueden tener un nivel de umbral interno. Si el umbral interno no es especificado, se asume que  $T_j$  es cero.

D) Forma funcional. El desarrollo del calculo basado en las entradas. Si se toman los productos del vector  $\underline{a}$  como el vector  $\underline{w}_j = (w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{nj})^T$ , se subtrae el umbral  $T_j$ , y se pasa ese resultado para una forma funcional,  $F(\ )$ . De esa manera, el calculo del nodo es:

$$F(\underline{w}_j \circ \underline{a} - T_j) = F\left(\sum_{i=1}^n (w_{ij} \circ a_i) - T_j\right)$$

Este calculo donde es una función diferencial o error entre la función de entrada y el umbral interno. La forma funcional puede ser raíz cuadrada, (producto),  $\log e^x$  y otras mas. Matemáticamente y la ciencia de la computación tiene fundamentada la función sigmoide (forma s) es particularmente ventajosa. Una función típica sigmoide es:

$$F(x) = 1/(1 + e^{-x})$$

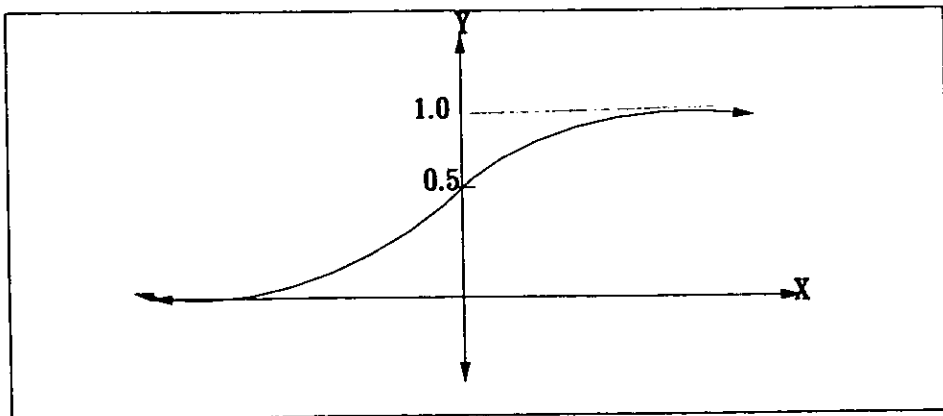


Fig. 8.6. Función sigmoide



Esta función incrementa monotonicamente con valores límites de 0 ( con  $x = -\infty$  ) y ( con  $x = +\infty$  ). Debido a los valores límites de la función sigmoideal, es llamada función umbral. Con un valor de entrada muy bajo, la salida de la función umbral es cero. Con valores de entrada muy altos, el valor de salida es uno. Todas las funciones sigmoideales tienen valores límites superiores e inferiores.

Otra función sigmoideal usada es la de la tangente hiperbólica:

$$F(x) = \tanh ( x) = (e^{-x} - e^{x}) / (e^{-x} + e^{x})$$

con límite de valores en -1 y +1. Una tercera función sigmoideal ( forma de S ) como es la relación de cuadrados:

$$F(x) = X^2 / (1 + X^2) \quad \text{si } x > 0 \quad \text{ó si } x \leq 0$$

con límites de valor de 0 a 1. Los efectos de inhibición y excitación de los factores de la carga esta directamente relacionado cuando se usa la función sigmoideal (por ejemplo  $w_{ij} < 0$  es inhibidor, y  $w_{ij} > 0$  es excitador). La función sigmoide es continua y monotónica, y la fuente de comportamiento nivelado como  $x$  aproximadamente a  $\pm \infty$ . Debido a que es monotónica esto también proporciona un entrenamiento mas eficiente. Frecuentemente se mueve bajo la pendiente de la curva de entrenamiento y la función sigmoide tiene pendientes de una fuente de comportamiento como una función de  $x$ .

E) Suma de la anomalía de los elementos de procesamiento, el bloque de construcción fundamental de una RN es el elemento de procesamiento. El elemento de procesamiento tiene un vector de entrada  $n$ -dimensional,  $\underline{a}$ , un valor de umbral interno,  $T_j$ , y  $n$  factores de carga o peso ( $w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{nj}, \dots, w_{nj}$ ) donde se multiplica por todas las entradas. Si el peso de entrada es lo suficientemente extenso el nodo esta activado y desarrolla un calculo basado sobre la diferencia entre el valor del peso de la entrada y el valor umbral interno. Típicamente una función sigmoideal es usada por  $f(x)$  desde una función umbral, es una fuente de comportamiento y proporciona un entrenamiento mas rápido.

La función sigmoideal es simple pero se usa para representar las funciones. Muchas funciones sigmoideales también pueden representar algunas funciones no lineales continuas. Del curso de una función sigmoideal



simple incrementa monolíticamente. Frecuentemente, una salida no es siempre cualquiera de los incrementos o decrementos monolíticamente. En casos semejantes, siempre se usan dos o más neuronas ocultas. Cada función es un número finito de periodos de un seno que oscila. Entre los problemas que se presentan se encuentran:

- a) El primer problema ocurre cuando con algún método empírico y puede ser coloquialmente como "basura dentro-fuera". Si los valores erróneos son una parte de los datos de entrenamiento, esto comprende el acercamiento de la red neural. Al mismo tiempo los valores extremos no son solamente válidos, pero estos son un valor especial debido a que estos muestran operaciones actuales en estados donde son un pequeño dato de proceso. El uso muestra que el establecimiento de valores máximos y mínimos pero esto no son suficientes.
- b) El segundo problema potencial ocurre cuando el rango de variabilidad de los datos es limitado o estos son introducidos significativamente dentro de los rangos de datos. Esto puede suceder cuando el rango de datos de entrenamiento es substancialmente bajo comparado con el rango de operación.
- c) El tercer problema es con los datos ruidosos que pueden tomar alguna extensión de la red neural que se puede filtrar sacando el ruido pero esto es algunas veces muy costoso por la precisión del sensor inteligente. Un filtro matemático externo para la RN puede filtrar el ruido desde su origen.
- d) Un problema que ocurre durante el entrenamiento con una entrada particular que no tiene una variación del rango significativo. Desde los valores de entrada para la variable que no oscila mucho, si esto fácilmente asume que las entradas no cuestionan y no pueden entrenar a la red usando estas variables. La red corre bien cuando las variables tienen esos valores pero cuando las variables cambian de valor, la red puede tener resultados inexactos debido a que la variable no es tomada en consideración.
- e) En el problema de usar pocas neuronas ocultas y entrenar además pocos pasos a través de los datos. Al mismo tiempo en medio no cambia a través de la neurona oculta para capturar todos las significancias no-lineales. Esto si es importante para ver el resultado del valor del error entrenado sobre diferentes números de neuronas ocultas.





f) El sexto es opuesto al quinto problema: "memorización" de datos con sobreajuste y sobreentrenamiento. Cada neurona oculta es un medio poderoso de captura no lineal.

g) El problema siete, "oscilación", solamente ocurre con algún algoritmo de entrenamiento. Algunos algoritmos de entrenamiento van a través de una situación o paso entero (llamado una época) de datos a través de la sobreespecificación de los pesos de datos. Otro algoritmo de entrenamiento sobre datos de peso para cada muestra por cada paso. El establecimiento de los pesos para cada muestra puede no ser rápida pero si puede causar problemas con la oscilación del valor de los pesos. Este problema es mas serio que el valor de los datos de entrenamiento si se toma cronológicamente.

Estos problemas no son específicos de las redes neurales; ellos son problemas potenciales de muchos métodos de regresión no-lineal. Antes de la simulación de este problema no existe, o el reajuste de todo el modelo empírico, es importante para el software de entrenamiento para tener caminos para detectar cuando ocurren esos problemas.

Los siguientes 4 pasos, mostrados en el figura 8.7. toman juego o son empleados cuando cada neurona es activada o procesada:

1. Varias señales ( entradas a las neuronas  $X_i$  ) son recibidas desde otra neurona .
2. Una suma del peso o carga de esas señales debe ser calculada.
3. El calculo de la suma es transformado por una función ( que normalmente, no siempre ) es fijada para tener una determinada neurona con el tiempo en el que la red es construida.
4. El resultado transformado (señal de salida de la neurona  $Y$ ) es enviado a otra neurona.



Introducida una serie de valores de entrada a la capa de neuronas de entrada, éstas transforman estas señales y transmiten los valores resultantes a las neuronas ocultas. Cada neurona de la capa oculta recibe una señal (modificada por el factor de peso de las conexiones correspondientes) de cada una de las neuronas de la capa de entrada. En las neuronas de la capa oculta se suma de forma individual las señales que reciben, transforman esta suma y transmiten este resultado a cada una de las neuronas de la siguiente capa. Al final las neuronas de la capa de salida reciben las señales ponderadas con los correspondientes factores de peso de las neuronas de la penúltima capa, suman estas señales y transmiten la suma transformada como salida de la red.

Los pesos de cada conexión inicialmente son aleatorios. Durante el entrenamiento, los errores entre los resultados de las neuronas de salida y los valores deseados se propagan hacia atrás (retropropagación) a través de la red. Con iteraciones repetidas de estas operaciones se consigue una serie conveniente de factores de peso. El objetivo es encontrar unos factores de peso óptimos que hagan mínimo el cuadrado de los errores entre la salida de la red y las deseadas. En esencia este método es un método del gradiente de primer orden.

¿Cómo es el proceso de aprendizaje de una neurona? El aprendizaje implica que la neurona de algún modo cambia el comportamiento entrada/salida en respuesta al medio ambiente. Debido a que la función de transferencia usualmente es fijada, el camino único de la salida desde una neurona puede cambiar debido a la entrada del medio por cambios en el peso de las entradas de las neuronas. De ese modo, las neuronas en las redes de aprendizaje por cambio en el peso de las entradas y del modelo interno de la red es formulado con el establecimiento de todos esos pesos. A través de ellos surgen algunas configuraciones posibles de redes neurales, en particular una de conocimientos como las redes de propagación posterior que son usadas extensamente en las aplicaciones de ingeniería química.

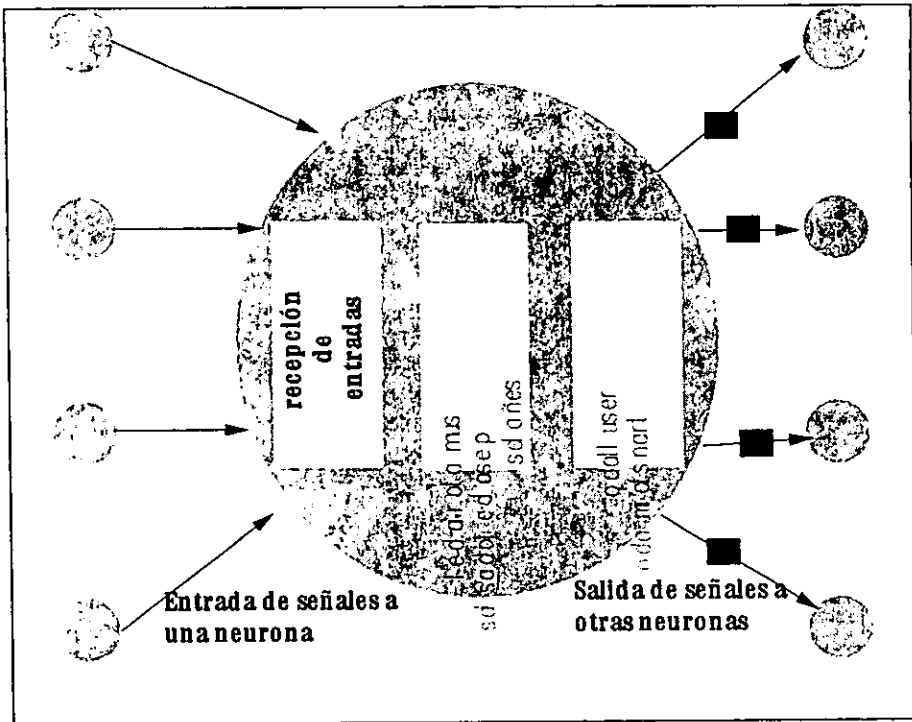


Fig. 8.7 . Pasos de procesamiento dentro de una neurona

Para el entrenamiento de una RN se ajusta el factor de peso únicamente para calcular el diseño de salida (respuesta) basado sobre la obtención de entradas de la replica de la relación de causa efecto deseada. El aprendizaje es el proceso actual de ajuste de los factores de peso basados en ensayo y error. La RN tiene algunos botones de ajuste, estos pueden ajustar algunas variables libres, y como una fuente de conocimiento de los ingenieros químicos, "para proponer el parámetro suficiente se puede como delinear un elefante blanco" (Mah, 1991). El cambio, sin embargo, es un ajuste esquemáticamente del factor de peso que tiene los resultados propios en un manejo eficiente. Con la RN, esta labor debe cambiar.

1. La estabilidad y convergencia. La fase de entrenamiento necesario para producir una RN esta es estable y convergente. Una RN globalmente establece el diseño de alguna salida establecida por una salida fijada. La estabilidad garantiza un resultado pero no es necesariamente una garantía del acercamiento del resultado. Una convergencia de RN



produce un acercamiento de la relación de entrada-salida. La convergencia esta relacionada con la verdadera o correcta RN. La magnitud del error entre los resultados del mundo real y esos predictores por la RN es una medición directa de la convergencia de la RN.

2. Tipos de aprendizaje. Estos son aproximaciones muy diferentes para el entrenamiento de la RN. Simpson (1990) en su libro de sistemas neurales artificiales clasifica el numero de acercamientos en donde casi todas las aproximaciones caen en dos grupos:

- aprendizaje supervisorio, un control de aprendizaje externo para conocer e incorporar la información global.
- aprendizaje sin supervisión, aprendizaje no externo es el que se emplea y la RN releva sobre ambos informadores, locales y externos. Frecuentemente, el desarrollo de la RN es un modelo que contiene la información.

Algunos de los procesamientos de aprendizaje son los siguientes:

Aprendizaje de corrección del error. El tipo mas común de aprendizaje usado todavía en las RN. Es una forma de aprendizaje supervisorio, donde se ajustan los pesos en proporción del vector de error de salida  $\underline{e}$ . Este vector de error de salida fue de  $n$  componentes, donde  $n$  es el numero de nodos dentro de la fase de salida. Si se denota  $n$ -th componente como  $e_n$ , y además se obtiene un componente del error para cada salida desde una RN. El aprendizaje de corrección del error para definir la salida del error desde un nodo simple sobre la fase de salida se establece como:

$$e_n = d_n - b_n$$

donde  $e_n$  es el error de la salida,  $d_n$  es la salida deseada y  $b_n$  es la salida calculada para el nodo  $n$ -esimo en la fase de salida solamente. Calculando el cuadrado del error total de la fase de salida,  $E$ , como:

$$E = \sum_n e_n^2 = \sum_n (d_n - b_n)^2$$



conociendo  $E$ , podemos calcular el cambio en el factor de peso para la conexión  $i$ -ésima para el nodo  $j$ -ésimo,  $\Delta w_{ij}$ :

$$\Delta w_{ij} = \beta_j a_i E$$

$\beta_j$  es una constante proporcional lineal para el nodo  $j$  ( típicamente,  $0 < \beta_j \ll 1$ ) y  $a_i$  es la  $i$ -ésima entrada para el nodo  $j$ .

Aprendizaje de refuerzo. Un tipo de aprendizaje supervisorio que esta relacionado cerradamente para el aprendizaje de la corrección del error. En el aprendizaje de la corrección del error, se calcula un vector de valores de error,  $\underline{e}$ , esto con  $n$  diferentes valores del error representan el desarrollo total de la red. En contraste el aprendizaje de refuerzo tiene solamente una escala de valor del error, para representar el desarrollo total de una red. Entonces se tiene solamente un valor del error para calcular con el aprendizaje de refuerzo que es generalmente mas fácil y simple que el aprendizaje de corrección del error clásico. El aprendizaje de refuerzo es de supervisión selectiva y requiere de menos información, posiblemente como intervalos poco frecuentes.

Aprendizaje estocástico. Utiliza la estadística, probabilidad y procedimientos azarosos para ajustar el peso o la carga de la conexiones. Se acepta un azar del cambio de peso si se reduce el vector del error,  $\underline{e}$ . Si el cambio incrementa a  $\underline{e}$  generalmente rechazamos el cambio. Sin embargo, se puede aceptar el cambio si de acuerdo con un análisis de probabilidad codificado específicamente, si esto tiene una mayor probabilidad de cambio para mover el mínimo global del error. Aceptándose ese pobre seguimiento o autorización del peso del proceso estocástico para surgimiento de un mínimo local y moverse para un mínimo global.

Utensilios de una RN. Tiene todas las conexiones y predeterminan los pesos (herramientas). Estos tienen una velocidad de avance y tienen que ser usados con una información adicional apriori dentro del conocimiento del lenguaje, proceso de comunicación, visión y robotica.



Aprendizaje Hebbian. Llamado así por Donald Hebb, 1949. Basado en el ajuste de pesos sobre una correlación entre dos nodos este peso esta asociado con esto. La forma simple del aprendizaje Hebbian usada es de proporcionalidad directa. Con el nodo  $a_i$  dentro de una fase de correlación para el nodo  $b_j$ , en otra fase se ajusta el peso  $w_{ij}$  de acuerdo con la ecuación:

$$w_{ij \text{ nuevo}} = w_{ij \text{ viejo}} + \beta_j a_i b_j$$

donde  $\beta_j$  es una rapidez de aprendizaje constante para el nodo  $j$ , de  $0 < \beta_j < 1$ .

*REDES DE PROPAGACIÓN POSTERIOR*. Siguiendo la consistencia de la información de redes de propagación - posterior de un mínimo de tres fases o capas jerárquicas

- una capa de entrada
- una capa media (algunas veces llamada oculta)
- una capa de salida

La red es constituida en semejanza con un camino de cada fase y que es completamente conectada a la siguiente fase.

En otras palabras, cada neurona de la fase o capa de entrada puede enviar una salida para que entre a la neurona de la fase oculta y cada neurona de la capa oculta puede enviar su salida a cada neurona en la capa de salida. Adicionalmente, una neurona inclinada o de preferencia esta suministrada en una invariable salida que es conectada a cada neurona en una fase de manejo y salida.

El numero de neuronas en la capa oculta puede ser variado basándose en la complejidad del problema y del tamaño de la información de entrada. Para un determinado numero de entradas, sin embargo, si la fase oculta es también extensa, puede no ser posible desarrollar un diseño utilizable. En contraste una capa oculta pequeña puede permitir la extensión drásticamente en cuanto al numero de iteraciones requeridas para la sucesión de la red.



Varios de los métodos clásicos para establecer los valores de los parámetros del modelo neuronal. Todos ellos buscan una correlación, de forma que se minimiza una función objetivo, como puede ser la suma de los cuadrados de los errores entre la salida del modelo y el valor real.

El algoritmo más utilizado en la etapa de entrenamiento de la red neuronal es el de retropropagación del error (Back-propagation). Aunque no es el más rápido es el método más utilizado (más del 90 % de las aplicaciones existentes).

El entrenamiento de las redes neurales se hace apartir de series de datos conteniendo las entradas y los correspondientes valores objetivos. Los datos de entrada pueden suponerse como una matriz de "n x p" donde n es el número de neuronas de entrada y p el número de serie de datos. Cada serie de datos lleva asociada una serie de m neuronas de salida.

El objeto del entrenamiento es conseguir que la red identifique y establezca correlaciones entre las "n" entradas y las correspondientes "m" salidas para las "p" series. En la fase de predicción, se presentara a la red una o mas serie de "n" datos de entrada y se pedirá el valor de "m" salidas para cada serie.

*FLUJO DE SALIDA ADELANTADO.* En una red de propagación hacia atras, una instalación azarosa de cargas en las interconexiones son usadas para presentar el primer diseño de la red. La fase de entrada recibe el diseño y pasa a lo largo de cada neurona en la capa media. Cada neurona calcula una señal de salida o activación de la siguiente fase o camino a seguir.

Primero, se suman las salidas  $I_j$  que es determinado por multiplicidad de cada señal de entrada en el tiempo de azar en el peso o esa interconexión:

$$I_j = \sum_i W_{ij} X_{i,j-1} + B_j \dots\dots\dots(1)$$



Ese total de pesos es transformado usando una función  $f(x)$  llamada función de activación de la neurona. Se determina la actividad generada en la neurona como un resultado de las señales de entrada en un tamaño particular.

Para una red de propagación hacia atrás y para casi todas las aplicaciones de ingeniería química, esa función es una función sigmoideal (en forma de "S"), incrementando monotonicamente, y la aproximación fijada asintóticamente de los valores como la aproximación de las entradas  $\pm$ .

Generalmente, el límite superior de la señal sigmoideal es +1 y el límite inferior es 0 o -1. La pendiente es utilizada para cálculos y son menos importantes las líneas horizontales que dan la forma general "S".

En una red como estas se tiene cosas interesantes acerca de las funciones de transferencia. Cuando la entrada de una neurona oculta es un número extensamente negativo, el término exponencial es un extenso número positivo y la salida de la fase oculta es aproximadamente -1. Cuando la entrada de la neurona oculta es 0, el término exponente es aproximadamente 1 y la salida de la fase oculta es 0. Cuando la entrada de la neurona oculta es un extenso número positivo, el término exponente es un número muy pequeño y la salida de la fase oculta es 1. Entonces entre los valores de la salida de la neurona oculta se forma una curva en forma de "S".

Las características de la curva pueden afectar la actividad individual de la neurona pero la red completa permite el trabajo desordenado de la fuente.

El seguimiento de la curva es expresado como una función de  $I_j$ , el peso de la salida de la neurona es frecuentemente usado.

$$X_j = f(I_j) = 1 / (1 + e^{-(I_j + T)}) \dots\dots\dots(2)$$





donde  $T$  es un simple principio o umbral. Esa señal de entrada transformada viene de la activación total de las redes neurales de la fase oculta, cuando, dentro del turno es usado para esa salida. Siguiendo a través de la red, esas salidas son tratadas como entradas para la fase o capa de salida. Una activación es calculada para cada neurona de la fase de salida usando la señal de la fase de enmedio u oculta y la función sinusoidal. Esas activaciones hacen una salida para la red.

GENERACIÓN DE SALIDA DESDE DATOS DE ENTRADA. Durante el proceso de generación de salida a partir de datos de entrada, las señales de flujo solamente en una dirección delantera o hacia delante desde la entrada para manejo de las fases de salida.

El tener establecido los valores de entrada esta impuesto en la neurona de la fase de entrada. Aquellas neuronas transforman la señal de entrada y transmiten el resultado de los valores de cada neurona en la fase oculta. Cada neurona de la fase oculta recibe una señal (modificada por los pesos de las conexiones correspondientes) para cada neurona de la fase de entrada.

La neurona de la fase oculta individualmente suman las señales que estos reciben al mismo tiempo con el peso de la señal desde la neurona de preferencia, transformando esa suma y transmitiendo el resultado de cada una de esas neuronas en la siguiente fase. Finalmente, la neurona en la fase de salida recibe el peso de la neurona en la fase de salida, recibe el peso de la señal desde la neurona en la penúltima fase, suma la señal y emite la suma transformada como una salida desde la red.

Entrenamiento de la red para ajustar el peso o carga con un error minimizado. El peso de cada conexión es azaroso inicialmente. Cuando la red pasada por entrenamiento y el error entre los resultados de las neuronas de salida y el correspondiente objetivo deseado del valor es propagado para atrás a través de la red. La propagación hacia atrás del error de las señales usado sobre datos de corrección de peso. Repetidas iteraciones de esta operación resulta dentro de una convergencia del establecimiento de las conexiones del peso, complaciente o condescendiente, una red esta entrenada para identificar y aprender los patrones entre el establecimiento de los datos de entrada y la correspondencia del establecimiento de los valores objetivo. Las ecuaciones que gobiernan el principio general para este método de entrenamiento de propagación del error en retroceso aparecen en el siguiente apartado.



*PROPAGACIÓN DEL ERROR HACIA ATRÁS.* El calculo de las salidas desde la activación adelantada es comparada con el valor deseado o el valor objetivo de la salida. Esas diferencias o errores convertidos de la base para la modificación de los pesos; si usualmente toma algunas iteraciones del par de valores objetivo. El principal retraso de la mayoría usa el método de propagación hacia atras por el uso de la "regla delta". Si minimiza iterativamente el promedio del cuadrado del error entre los valores de salida de la neurona y el valor deseado de salida correcto.

Esto es para el primer calculo del error del gradiente  $\delta_j$  para cada neurona en la fase de salida:

$$\delta_j = X_j (1 - X_j) (T_j - X_j) \dots\dots\dots(3)$$

donde  $T_j$  es el valor objetivo correcto para la neurona de salida  $j$ . El error del gradiente es determinado por el manejo de fase por calculo del peso total del error por una fase previa:

$$\delta_j = X_j (1 - X_j) \sum_k \delta_k W_{kj} \dots\dots\dots(4)$$

donde  $k$  es la neurona de la fase previa. De ese modo el error es propagado una capa o fase atrás. El mismo proceso es aplicado repetidas veces, hasta que la fase de entrada es alcanzado. Este proceso de propagación del error hacia atrás es conocido como el flujo de error para atrás. Este error del gradiente es también usado para datos del peso de la red:

$$\Delta W_{ji} (n) = \beta \delta_j X_i \dots\dots\dots(5)$$

$$W_{ji} (n+1) = W_{ji} (n) + \Delta W_{ji} (n) \dots\dots\dots(6)$$

donde  $n$  indica el numero de iteraciones durante el ensayo y  $\beta$  es la velocidad de aprendizaje que proporciona el tamaño del paso durante la búsqueda descendente del gradiente. Usualmente un termino de momentum que determina el efecto de cambiar de peso previo sobre el cambio presente dentro de un espacio de peso, es incluido para mejorar la conveniencia. El cambio del peso después de la  $n$ -esima iteración es:

$$\Delta W_{ji}(n) = \beta \delta_j X_i + \alpha \Delta W_{ji} (n-1) \dots\dots\dots(7)$$



donde  $\alpha$  es el término de momentum que tiene un valor entre 0 y 1. De ese modo, la propagación hacia atrás de un algoritmo descendente de gradiente que ensaya para minimizar el promedio del cuadrado del error de la red para mover atrás el gradiente de la curva del error. En un sistema simple, la curva del error es una parábola o una curva de figura honda la red eventualmente consigue alcanzar el fondo del hueco.

En aplicaciones de procesos químicos reales, sin embargo, la red no es un sistema simple unidimensional y el error de la curva no es una suave curva hueca, en su lugar se encuentra una de alta complejidad, multidimensional que posee varios valles y crestas. Como un resultado, la instrucción de la red halla este punto de una manera cambiante y muy transformada. Esto es como se observan las técnicas que son útiles en el modelado de las redes neurales para aplicaciones de la ingeniería química.

TÉCNICAS DE INSTRUCCIÓN O EDUCACIÓN. El entrenamiento de la red puede hallar el punto bajo en la curva del error que puede ser fácil de lograr por el uso de algunas combinaciones de las siguientes técnicas:

- Reiniciando el peso. Un camino para hallar el mínimo global en la curva del error es el principio del entendimiento además de un establecimiento del peso inicial. Esto puede llevarse por una generación azarosa del establecimiento del peso de cada tiempo de la red hecha del aprendizaje tradicional. Al mismo tiempo si el nuevo punto de partida es de forma distante a el establecido originalmente como peso, la red mueve el nuevo mínimo sobre la superficie del error. Como resultado la red se mueve rápidamente en apoyo del mínimo global.
- Agregar los pasos de cambio del peso. Al mismo tiempo, la red cumple con las oscilaciones alrededor de un peso establecido debido a la escasez de mejoramiento del error. En ese punto, todas las necesidades son un empuje pequeño para recibir el regreso en la trayectoria. Esto puede ser llevado por movimientos azarosos del peso de la nueva posición (pero externamente distante desde una corriente única) sobre la superficie del error. Un camino para mover los pesos es por variar cada peso por adicionar cerca del 10 % del rango de la oscilación del peso.



- Evitar la sobreparametrización. Si es muy fácil hacer la interpretación del aprendizaje con demasiadas neuronas en la fase oculta, pero esto causa sobreparametrización de el modelo, cuando esto tiene una pobre predicción. Un camino para evitar eso es la designación de la red con límites razonables. En general, el número de neuronas de la fase oculta puede ser determinado por un número de patrones de aprendizaje (casos o problemas): Experimentando sin embargo con un número de neuronas diferente para llegar a el número correcto.
- Cambio en el término de momentum. Esto es cosa fácil para algunos software comerciales o de casa. El término momentum  $\alpha$  es implementado por adicionar una fracción del cambio del peso continuo para el siguiente peso del paso. Estos son los algoritmos que pueden cambiar el nivel de ese momentum basado en el error involucrado. Simplemente, una vez más experimentando con diferentes niveles que permiten el aprendizaje para optimizar más rápidamente.
- Evitar repeticiones o menos datos con ruido. Repetir menos información ruidosa hace a la memoria de la red el patrón de velocidad que generaliza ese rasgo o característica. La memorización usualmente implica que la red este solamente respondiendo a la neurona para un patrón particular de entrada. Si la red jamás permite ver exactamente la misma entrada del patrón más que una vez, se tiene un número mínimo de memorización. Esto puede ser también llevado para agregar un poco de ruido para el manejo establecido.
- Cambios en el aprendizaje de la tolerancia. Durante el entrenamiento, el aprendizaje del proceso se detiene cuando el error para todos los casos falla abajo de la tolerancia del aprendizaje. Si la tolerancia del aprendizaje es demasiado pequeña, el aprendizaje del proceso jamás se para. Por tanto siempre comienza con un alto nivel de tolerancia y monitoreo del cambio del peso con decremento en los niveles de tolerancia. Por experimentar ese camino, se puede hallar el nivel de tolerancia cuando esto no es un cambio significativo en el peso de algo más.
- Incremento del tamaño de la fase oculta. Si todas las fallas, incrementan el número de las neuronas ocultas para mejoramiento del modelo. En general el incremento del 10 % no es un incremento sustancial en el tiempo. Al mismo tiempo, esta técnica en combinación con las técnicas ya mencionadas puede dar por resultado un mejoramiento del desarrollo del modelo.



INTERPRETACIÓN DEL PESO DE LAS CONEXIONES DE LA RED. La división de los pesos de las conexiones hace una red neural una buena herramienta para el modelado de la ingeniería química. Esa partición evalúa la importancia relativa de los factores de entrada usados por la red para llegar a una conclusión. Un método simple de interpretación de los factores de entrada para los propósitos de análisis causal fue introducido recientemente. Esta aproximación enfocada sobre las velocidades de salida con el peso de las conexiones de la fase de entrada. El peso a lo largo de la senda desde la fase de entrada por los nodos de la fase de salida indican la importancia predicativa relacionada a la independencia.

Asignar una red considerada con un numero NV de neuronas de entrada y NH con un numero de neuronas de la fase oculta. El peso de la fase oculta para el adiestramiento o entrenamiento de la red puede ser escrito como:

$$\begin{array}{cccccccc}
 W_{11} & W_{12} & W_{13} & W_{14} & \dots & W_{1j} & \dots & W_{1NV} \\
 W_{21} & W_{22} & W_{23} & W_{24} & \dots & W_{2j} & \dots & W_{2NV} \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\
 W_{i1} & W_{i2} & W_{i3} & W_{i4} & \dots & W_{ij} & \dots & W_{iNV} \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\
 W_{NH1} & W_{NH2} & W_{NH3} & W_{NH4} & \dots & W_{NHj} & \dots & W_{NHNV}
 \end{array}$$

Estos pesos o cargas pueden ser utilizados para la división del efecto de la suma sobre la fase de salida por medio de la siguiente ecuación (usando el valor absoluto de cada carga o peso).



Contribución de la j-esima entrada:

$$C_j = \sum_i F_{ij} O_i \dots\dots\dots (8)$$

y el porcentaje de la contribución de la j-esima entrada:

$$P_j = 100 C_j / (\sum_i C_i) \dots\dots\dots (9)$$

donde  $F_{ij}$  es el peso de la fracción de la i-esima neurona, j-esima entrada, y es obtenido por:

$$F_{ij} = W_{ij} / (\sum_i W_{ij}) \dots\dots\dots (10)$$

y  $O_j$  es el peso de las conexiones de la salida. El porcentaje de la contribución de cada una de las entradas indica la relativa importancia de esa entrada dentro del modelo de la red neural. Esa contribución es análoga a la contribución de la varianza en el modelo estadístico.

Inicialmente, todos los valores de peso son valores aleatorios. Por esta razón, las salidas de las neuronas de la ultima capa (o salida) serán diferentes de las deseadas. Esta diferencia (o error) servirá para el reajuste de estos pesos. En algoritmos de retropropagacion (Back-Propagation) esto se hace de forma iterativa: cada serie se toma secuencial o aleatoriamente de los datos de entrenamiento.

Con la aplicación de la llamada "Regla Delta" dentro del algoritmo se intenta minimizar una función objetivo relacionada con los cuadrados de los errores de las salidas de la red. Esta regla requiere que la función sigmoide utilizada para cada neurona sea continua y diferenciable. Este método identifica una señal de error asociada a cada neurona en cada iteración para una serie dada.

Mientras que resulta facil calcular las señales de error para las neuronas de la capa de salida, no lo es para la(s) de la(s) capa(s) interna(s). Este algoritmo toma su nombre del hecho de suponer que las señales de error se retropropagan hacia atrás en la red.



PROCESO DE IDENTIFICACIÓN CON LAS REDES NEURALES. La creencia común de la que las redes neurales pueden ser usadas en el modelado del proceso como una caja negra no es completamente cierta. La implementación efectiva siempre requiere de un grado mínimo de conocimiento del proceso para identificar las entradas relevantes de la red.

La identificación de modelos de procesos dinámicos desde datos experimentales de salida-entrada usualmente involucran los siguientes pasos:

1.- Designación experimental. Es el más importante estrado o escenario después de la decisión acerca de que clase de evaluación tiene que ser hecha. El tipo y tamaño de la designación de entrada, la región de operación, el orden de cambio de las múltiples entradas, etc. tiene que ser determinada. En la muestra se toma una visión la calidad del producto de la planta que no es afectada y debido a esa evaluación es conducida en línea en la operación de la planta. De ese modo se puede tomar precauciones acerca de cuando una entrada puede sufrir variaciones. Si una desviación de las salidas del proceso dentro de los límites aceptables puede mostrar provisionalmente el hecho de permitir la operación de control que hace la compensación de los cambios en la entrada a llevar las salidas de regreso a límites aceptables. Un extenso número de movimientos compensatorios permite introducir correlaciones deseadas en la entrada. Las redes neurales son muy eficientes para la interpolación de ese modo experimentalmente mostrado por la designación en algunas vías o caminos que los datos de entrenamiento incluyen en la información desde todos las regiones de operación deseable.

2.- Colección de datos. Las plantas químicas son caracterizadas por grandes y extensas constantes de tiempo, tiempo de retraso, y los tiempos en estado estable pueden tomar algunas horas. Por lo tanto, la evaluación en la planta puede ser normalmente conducida en algunos ideas continuamente. Las entradas son cambiadas azarosamente de acuerdo a una especificación y todas las salidas son gravadas. Al mismo tiempo la colección de datos del proceso mostrado por el monitoreo para algunas fallas semejantes a una válvula saturada, falla en una bomba, etc. son para evitar la degeneración o corrompimiento de los datos experimentales para identificación.



3.- Procesamiento de datos. Los datos que se obtiene desde la evaluación de la planta puede ser usados en estudios de identificación. Es filtrado para remover divulgación ilimitada, presente invariabilidad en todas las aplicaciones del tiempo real. También las salidas de orificio pueden ser causadas por algunos errores en la medición que pueden ser removidas. El obstáculo de datos durante regiones donde un proceso falla es conocida para sucesos que pueden ser "rebanados" fuera de ese modo esto no corrompen el modelo.

4.- Selección del modelo. En sistema de control de muestra de datos, un proceso multivariable generalmente puede ser representado por:

$$Y_K = F( Y_{K-1}, Y_{K-2}, Y_{K-3}, \dots, Y_{K-M}; X_{K-1}, X_{K-2}, X_{K-3}, \dots, X_{K-N} ) \dots (11)$$

donde  $Y_k$  y  $X_k$  representa los vectores de entrada y salida, los subíndice  $k$  se refieren a la muestra instantáneas y  $F$  representa la función de relación entre las entradas y salidas. En los estudio de identificación clásico, una forma de la representación de la función del comportamiento de entrada-salida puede ser especificada y los parámetros en esta forma pueden ser especificados. Usualmente algunas hipótesis son hechas alrededor del proceso, semejante a la linealidad, tiempo de invarianza, etc. y un modelo de divulgación dividido es frecuentemente incluido como representación del modelo dinámico. Algunos importantes procesos químicos son no-lineales y frecuentemente no es posible especificar la relación funcional exacta entre las entradas y las salidas, pero la red neural necesita ser fundamentada en sus contextos útiles donde estos no requieren una función que se especifique explícitamente. Solamente la topología o la estructura de la red tiene que ser especificada, esta especificación incluye el numero de neuronas en la fase de entrada, oculta y de salida. Los valores pasados de entrada y salida son usados en forma de vectores de entrada a la red. El numero de valores pasados de entrada a usar depende de los tiempos muertos presentes en el sistema, pero el numero de salidas pasadas depende del orden del proceso. El numero de neuronas en la fase oculta es especificado por procedimiento de ensayo y error. Si  $n_i$ ,  $n_h$ ,  $n_o$  son el numero total de neuronas en cada fase, entonces el numero de carga,  $n_{wts}$ , en el modelo de redes neurales es por:

$$n_{wts} = (n_{i+1}) n_h + (n_{h+1}) n_o \dots (12)$$





## 5.- Estimación de parámetros

6.- Validación del modelo. Para el propósito de modelado, el preprocedimiento de datos experimentales de entrada-salida es dividido en tres escenarios: escenario de introducción y adiestramiento, escenario de validación de carga o cruce y el escenario de validación. El dato en el escenario de adiestramiento es alimentado a la red y la carga es continuamente adaptada de ese modo esta predice el error para ser minimizado. Al final de la iteración, la red es siempre seguida de la predicción de salidas del escenario de validación de cruce. Los pesos o cargas son seguidos a cambios solamente el entrenamiento y no durante la validación de la carga o cruce. Si la pérdida del error en el escenario de cruce es mayor que una tolerancia especificada, la red es otra vez alimentada con los datos de entrenamiento para otra interacción. Este proceso de entrenamiento y validación de la carga es seguido hasta que cualquiera de los dos errores del escenarios sea menor a la tolerancia especificada, un máximo de iteraciones es rechazada o el rechazo del error del escenario de cruce en un mínimo con respecto al número de iteraciones, cualquiera de las dos. La carga obtenida como el final del proceso característico del modelo de red neural del proceso multivariable.

La continuidad de los tres pasos; selección del modelo, estimación de los parámetros y validación del modelo son usualmente iterativos. El procedimiento iterativo es llevado hasta que satisfaga el modelo. Hasta la validación del modelo obtenido y hasta haber aumentado la confianza en la generación de habilidad, si son evaluados además los datos experimentales del tercer escenario; el escenario evaluado. Si la predicción correspondiente a esos datos del escenario son no satisfactorios desde la estructura del modelo tiene permitido ser alterado, cualquiera de los dos por cambios o modificación del número de neuronas en la fase oculta, o por cambio en el número de valores pasados de entrada y/o salida. Este proceso de selección del modelo, entrenamiento y validación es iterativo hasta que un modelo satisfactorio es obtenido.

La **ventaja** de las RNs está en su fortaleza contra las distorsiones en la entrada de datos y su capacidad de aprender. Esto a menudo sirve para resolver problemas que son demasiado complejos para tecnologías convencionales ( por ejemplo, problemas que no tienen soluciones



algorítmicas o para las cuales una solución algorítmica sería demasiado compleja para ser hallada ) y a menudo son más compatibles con problemas que las personas resuelven bien, pero para las cuales los métodos tradicionales no funcionan.

Algunos factores que motivan el uso de modelos de redes neurales son: (1) estos tienen la habilidad para usarse en una gran cantidad de sensores de información, (2) estos pueden responder con alta rapidez a los sensores de salida. Otras técnicas son limitadas por el tiempo que toman para ejecutar eso mismo en el hardware electrónico, (3) estos poseen un alto grado de firmeza y tolerancia a las fallas debido a esa representación distribuida, (4) estos tienen una capacidad de mapeo general, puesto que las técnicas de detección de fallas tradicional involucra un modelo detallado de el sistema, (5) el conocimiento de una red neural es especificada en un extenso mensaje a través del aprendizaje, puesto que casi todas las técnicas confían en un algoritmo preespecificado.

Debido a las características de las redes neurales poseen un número de propiedades que hacen de ellas atractivas para la representación del conocimiento en la ingeniería química semejantes a la detección de fallas y diagnósticos, control de procesos, designación de procesos, simulación de procesos que organizan y detectan fallas desde datos del proceso impredecibles y/o imprecisos.

La red neural es simplemente una herramienta más del modelado para computadoras que ofrece algunas ventajas sobre las fuentes de conocimiento y las técnicas de modelado de la computadora tradicional.

Otras ventajas que se pueden mencionar son las siguientes:

1) comportamiento adaptativo, la red neural tiene la habilidad de adaptarse o aprender dentro de las respuestas de ese medio ambiente. Estos aprenden a través del entrenamiento cuando tienen el diseño de las entradas y salidas de la RN y ajustan por sí mismas la minimización del error.



2) propiedades de reconocimiento de diseño o patrón, la red neural desarrolla patrones de reconocimiento de multivariantes de muchas fuentes o muy profundas; desde luego esta área es donde la red neural tiene probablemente el hallazgo de casi todos los casos y aplicaciones de ingeniería. En ingeniería química, control de procesos, diagnóstico de falla que involucran cantidades excesivas de reconocimiento de patrones. No es sorprendente que estas áreas de aplicaciones tienen una mayor atención. Otra disciplina de ingeniería que requiere de reconocimientos de patrones y además el ver las aplicaciones de la RN. Un ejemplo clásico es robótica, donde la RN fundamenta su aplicación en ambos, control y visión.

3) capacidad de filtrado: baja sensibilidad para ruido y la información incompleta. Se puede engañar por decir que la RN es insensible al ruido y a la información incompleta. Sin embargo, comparado con la empírica directa, el modelo adaptado a una curva donde la RN está definitivamente baja en la sensibilidad del sensor relativo. En los modelos empíricos, cada variable independiente usualmente juega un papel crítico. Pero en una RN cada nodo incorpora solo un microrasgo del problema; sin embargo, si la entrada dentro de un nodo es incompleta o ruidosa, esta pobre entrada no manifiesta en sí misma como separadamente dentro de la RN. La RN puede distribuir con el mundo imperfecto, generaliza y fuerza una conclusión sustancial más efectivamente que el modelo empírico poco flexible.

4) abstracción automática, la red neural puede averiguar la relación esencial y puede además ser automáticamente. No se necesita el dominio del experto que requiere sistemas de base de conocimiento. Instalado, a través del entrenamiento con los datos numéricos directos (al mismo tiempo imprecisos) y la RN puede automáticamente determinar la relación causa-efecto.

5) potencial para uso fuera de línea, la red puede tener un muy largo tiempo de entrenamiento, pero una vez entrenada, estos pueden calcular el resultado, si tiene el potencial para ser usado fuera de línea en un sistema de control. Notar que como este punto en el tiempo, la RN debe ser entrenada fuera de línea.



La principal ventaja de las redes neurales sobre otros métodos de modelado son: primero, que la estrategia de control para un proceso puede ser determinado directamente fuera de los detalles acerca del proceso, y fuera de una idea formal acerca de una función objetivo cuantitativa para la operación del proceso; y segundo, ese extenso volumen de datos de operación de la planta puede ser usados fácil y eficientemente para entrenar las redes.

Una limitación de la computación neural es que las redes son entrenadas y no programadas, requieren de una cantidad suficiente de datos de la selección de propiedades que deben estar disponibles para llevar a la red a un modelo aproximado de un proceso complejo. También el entrenamiento del proceso debe ser periódicamente adecuado para mantener el acercamiento de la red. Si esto es combinado con procesos dinámicos en tiempo real, la red se acorta y el acercamiento de estas predicciones es mayor. Se pueden mencionar las siguientes limitaciones:

- 1) tiempo de entrenamiento muy extenso, el entrenamiento puede tomar suficiente extensión para hacer la RN impracticable. Casi todos los problemas simples requieren de más de 1000 pasos de tiempo para el entrenamiento de la red y los problemas complejos pueden requerir de más de 75000. Dependiendo del tamaño de la red, este entrenamiento puede ser superior de 6-24 horas para computadoras principales.
- 2) Gran cantidad de datos de entrenamiento. Si los pequeños datos de entrada-salida que existen acerca de un problema o proceso, se puede reconsiderar el uso de la red neural. Consecuentemente, la red es más apropiada para problemas con una gran cantidad de datos almacenados o cuando estos siguen el entrenamiento de la red con un simulador separadamente.
- 3) No garantiza resultados óptimos: la propagación del error hacia atrás es un camino creativo para ajustar la red, pero esto no garantiza que la red pueda operar apropiadamente. El entrenamiento puede inclinar la red para hacer el acercamiento en alguna zona de operación pero inadecuadamente en otras zonas. En suma, se puede inadvertidamente conseguir el atrapar un mínimo local durante el entrenamiento.



4) No garantiza la seguridad al 100 %: mientras esto aplica todas las aplicaciones computacionales, este punto es particularmente verdadero en las redes neurales. Dentro de las aplicaciones del diagnóstico de falla, en algunos casos la red solo puede diagnosticar el 1 % del tiempo. En otras fallas son el mismo problema se puede mal diagnosticar hasta un 33 % del tiempo. Esto para aplicaciones militares requiere del 100 % de seguridad o confianza y se debe mostrar precaución cuando se usa una red neural.

*Las redes neurales son diferentes de los sistemas expertos en que éstas aprenden directamente a partir de ejemplos, usando algoritmos especiales, en lugar de partir de reglas basadas en el conocimiento que un experto tendría que utilizar para resolver un problema (tabla 1). El usuario entrena a la red neuronal mostrándole series de datos de entrada con sus correspondientes salidas. La red aprende la correlación entre las entradas y las salidas esperadas y es capaz, no solo de repetir estos ejemplos sino de establecer relaciones generales entre entradas y salidas que no se habían usado durante la fase de entrenamiento. Por eso se dice que una red neural entrenada es capaz de interpolar de forma inteligente.*

Los programas de sistemas expertos usan los símbolos clásicos de procesamiento. El programa manipula símbolos como átomos y listas para solucionar problemas. Del otro lado las redes neurales usan procesamiento subsimbólico. Para entender el procesamiento subsimbólico primero se necesita examinar la historia del desarrollo de la red neural. La red neural es el resultado del desarrollo de la inteligencia artificial para intentar el conocimiento y modelado del comportamiento cerebral. Casi todos los neurologos creen que la inteligencia esta mas allá del procesamiento simbólico. Algunas manipulaciones subsimbolicas existe para manifestar en si misma eventualmente como macroscopica, inteligente, comportamiento simbólico.

Los sistemas expertos operan simbólicamente sobre una escala macroscopica. Estos usan un procesamiento simbólico requiriendo del conocimiento de relaciones y no cuida cuando esas relaciones son desarrolladas. La red opera subsimbólicamente sobre una escala microscopica.



La interacción entre los nodos es una fuente definida y ajustada hasta que la relación de entrada-salida deseada es igualada apropiadamente. Además la red esta íntimamente conectada con el desarrollo de las relaciones. La microscopia del procesamiento subsimbólico que ocurre dentro de la manifestación de la red en si mismo como microscopio, simbólico y desarrollo inteligente.

<b>TABLA 1. Diferencias entre sistemas expertos y redes neurales.</b>	
<i>Sistemas expertos</i>	<i>Redes neuronales</i>
Excelente capacidad de explicación.	Escasa o nula capacidad de explicación.
Necesita de un experto.	Requiere muchos ejemplos, pero no un experto.
Tiempo medio de desarrollo entre 12 y 18 meses.	Tiempo de desarrollo de semanas a meses.
Sistemas adecuados para cuando hay pocos ejemplos y SI un experto.	Muy útil cuando hay muchos ejemplos y NO un experto.
Muchas referencias sobre su empleo.	Aumentando el numero de referencias.
Sistemas grandes pueden resultar difíciles de mantener si no se diseñan con cuidado.	No se pueden construir grandes redes. Es mejor, pequeñas unidas para resolver problemas complejos.
Construidos a partir de la extracción del conocimiento y el desarrollo basado en reglas.	Construido a través del entrenamiento usando ejemplos.
Funcionan bien en ordenadores digitales convencionales.	Para las redes grandes es mejor el empleo de tarjetas especializadas sobre los ordenadores convencionales.

APLICACIONES DE LAS REDES NEURALES. ¿Donde se aplica la red neural?. La red neural es una aproximación posible para considerar siempre que en la reproducción de un comportamiento observable es necesario y un modelo del comportamiento esta disponible como un establecimiento del patrón de entradas y salidas. El requerimiento del modelo puede ser de una simple entrada, una simple salida o de configuración multivariable. Una



aplicación común de la red neural es para modelado de la dependencia de las variables de salida del proceso sobre las de entrada del proceso. Si la relación es lineal, una red neural es aplicable. Para la dependencia del modelo no lineal, o una red no lineal, posiblemente con múltiples fases es necesario usar la red de entrenamiento para predecir la respuesta del proceso para una entrada antes de aplicar la entrada al proceso; esa red neural en si misma no tiene sentido del tiempo y puede asignar las entradas en un momento para las salidas en otro momento, en donde este retraso es necesario. Algunos niveles de reconciliación en el estado estable puede ser necesario para evitar el aprendizaje erróneo de la respuesta del proceso desde una situación de cambio continuo.

Otra aplicación es la identificación de una situación particular desde un valor de proceso establecido. La red de entrenamiento puede ser usada para notificar la operación del proceso en situación que requiere la atención específica. El resultado obtenido puede ser continuamente depurado o refinado por el reporte de operación para comparar con un sistema de alarma convencional de mezclado. El algoritmo de entrenamiento puede estar adaptando la red para producir la alarma de señales como funciones de las variables de proceso fuera de línea. Por ejemplo: la red neural puede estimar la variable controlada que es generalmente no medida fuera de línea y el análisis de laboratorio esta además frecuentemente para el control de proceso; la red neural puede proporcionar sensores soft fuera de línea para otros algoritmos de control avanzado; la red neural puede proporcionar la variable controlada para control multivariable; la red neural es una alternativa posible para análisis de costo.

Las redes neurales se vienen empleando en diversos campos, gracias a su excelente comportamiento ante datos con mucho "ruido" en los que superan a los métodos estadísticos de regresión múltiple, etc. Así, por ejemplo, de acuerdo con un estudio del Servicio Marítimo de Pesca de los Estados Unidos, el método normal de regresión múltiple para la predicción de la pesca en los caladeros del Atlántico tenían un nivel de confianza del 80 % con un error medio del 11 % para el periodo de 1983-1990. Con el empleo de modelos neurales el error medio para el mismo periodo bajo hasta el 1.9%.



La lista de aplicaciones actuales de esta tecnología esta ampliándose de forma continua. Entre ellas se puede citar: análisis de mercado (stocks, precio, costos), identificación de polímeros y compuestos químicos, control de calidad, predicción del clima o simulación y control de procesos químicos.

Ahora se sabe que las redes neurales pueden ser utilizadas para resolver problemas actuales de la ingeniería química. Entre los posibles campos de especial interés para la aplicación de técnicas de inteligencia artificial y en particular de las redes neurales en la industria química se podrían citar:

Un caso que involucra el desarrollo de la cinética de hidrogenación. Fue planteado para incrementar la producción de la resina de hidrocarburos sin sacrificar producto y calidad. Los datos de la velocidad de hidrogenación constantes, por así decirlo, son procesados a través de un algoritmo de la red para obtener un modelo cinético no-lineal donde se deben usar parámetros para la computación de la red. El modelo obtenido promedia el efecto sobre las cuatro regiones de velocidad de reacción que generaliza los parámetros en diferentes regiones deseadas en el modelo de red neural. De esa manera, el modelo de la red neural es mas robusto en las cuatro regiones debido a la disponibilidad de interpolaciones de los resultados igual cuando los datos son perdidos.

Las redes neurales también ayudan a mejorar el proceso de elaboración de un catalizador. En este caso una solución de catalizador de resina líquida para modelado fue envasado en cilindros de acero al carbón y un precipitado formado en los cilindros. Como resultado de esa precipitación la concentración del ingrediente activo dentro del catalizador decremente para bajar los límites de especificación. La cantidad de precipitación para algunos lotes de producción fueron procesados a través de un algoritmo de la red neural para obtener un modelo no-lineal. En suma, el peso de la red neural fue dividido para hallar las contribuciones de las variables significativas en el modelo.

Uso de un modelo para hacer un pronóstico del mercado. Las redes neurales también están disponibles para decisiones de mercado no técnicas. Por instantes, en orden para hacer un plan de toda la planta para la expansión de la capacidad, gasto o costo de capital, desarrollo del





producto, y el apoyo de la planta si es necesario para el desarrollo de una proyección realista para el mercado de algún producto. Para un polímero, un modelo macroglobal del desarrollo previamente con evaluación del mercado en el extenso término de la demanda, no puede predecirse la tendencia del mercado en términos cortos para decisiones administrativas futuras. Para sobrellevar este problema a un modelo basada en la macroeconomía sobre la clave del indicador económico fue desarrollado para predecir en términos cortos sobre el volumen de la producción.

Otra área de aplicación es el análisis de composición química y ambiental en donde se tienen los datos del espectro semejante el infrarrojo, infrarrojo cercano, resonancia magnética nuclear cuyas mediciones son utilizadas como entradas para identificación de componentes y predicción de propiedades de la mezcla. Se han usado RN para análisis con detectores de emisiones acústicas para evaluación no destructiva y también para la detección de impactos de microsegundos en la estación espacial Libertad.

Otra aplicación es la invención de los modelos de simulación muy complejos. Semejante simulación involucra transferencia de calor/mecánica de los fluidos, fenómenos de las reacciones cinéticas de donde puede resultar sistemas de ecuaciones diferenciales no-lineales. Estos modelos solo pueden utilizarse para predecir salidas desde una entrada establecida, y no para predecir condiciones de entrada para una salida establecida con ese mismo tiempo.

Simulación y control de proceso. La aplicación de la mayor parte de las técnicas que constituyen el denominado "Control avanzado de procesos" requiere para su funcionamiento la definición "modelos dinámicos del proceso". Esto puede ser la parte esencial de la aplicación, ya que el controlador ha de especificarse para optimar una trayectoria deseada en un horizonte extendido de predicción, comportándose como el inverso del proceso.

Habitualmente en los procesos químicos y, en especial en los petroquímicos, el gran número de variables involucradas y la presencia de reacciones con cinéticas desconocidas o al menos complicadas resulta difícil la elaboración de un modelo teórico o semiteórico. Por ello es necesario acudir a técnicas estadísticas para la determinación de los parámetros que ajusten los datos a unas ecuaciones predeterminadas. Esto trae consigo evidentemente el problema de la definición de la ecuación de ajuste que, en muchos casos no es fácil de elegir.



En este campo, donde existe una base de datos importante, la aplicación de las redes neuronales suele proporcionar mejores resultados de predicción que las técnicas estadísticas convencionales, aumentando dicha mejora con la complejidad del tema y con el tamaño de la base de datos considerada.

La red neural ofrecen algunos avances distintos sobre otras técnicas de modelado típicas usadas en la aplicación del control de proceso. A través de la aplicación industrial fijada en un principio, pero muchas investigaciones son difícilmente desarrolladas en modo práctico. Mientras que puede ser prematuro para una organización de manufactura para la aceptación completa de esa tecnología, una propagación predeterminada en la organización puede ser prudente explorar sobre su aplicación potencial para desarrollarlo.

*Redes neurales y modelado empírico.* Una red neural es una herramienta de modelado empírico y si opera por ajuste de curva. Sin embargo, existe una diferencia notable entre la red y el modelo empírico típico. Primero la red neural tiene una mayor capacidad de filtrado que el modelo empírico debido al concepto de microrasgos, en otras palabras cada código del nodo de un microrasgo de los patrones de entrada-salida solamente escaso. La red además tiene un poderoso paralelismo con cada operación del nodo independiente uno de otro. Se puede ver cada nodo como un procesador y esos procesadores operan totalmente en paralelo. Como un resultado, la red no depende de un simple nodo tanto continuamente como por instantes, un modelado empírico depende de una variable independiente. Debido a esos conceptos de los microrasgos, la red tiene la capacidad de filtrado y puede generalmente desarrollar mejor el modelo empírico con ruido o datos incompletos.

Una segunda ventaja que la red neural tiene sobre los modelos empíricos es la habilidad de adaptación. Una red tiene un algoritmo de entrenamiento específico donde se ajustan las conexiones de pesos entre nodos únicamente el patrón de entrada-salida es obtenida. Si las condiciones de cambio semejantes al desarrollo del modelo de la red es inadecuado podemos sujetar la red neural a un futuro entrenamiento bajo esas nuevas condiciones para el desarrollo correcto. En resumen se puede designar la red para disturbios periódicamente si el desarrollo de entradas-salidas resulta dentro de la continuidad, fuera de línea, modelo de corrección de si mismo. Los modelos típicos empíricos no tienen esa habilidad.



Tercero, una red neural esta en sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas exactamente. La mayoría de herramientas de modelado empírico diseñan o mapean una o mas de dos o tres variables dependientes. Una red neural puede mapear o trazar algunas variables independientes con algunas variables dependientes. Consecuentemente, la red desarrolla mejor un patrón de reconocimiento de esos sistemas de modelado empírico tradicional. En resumen, la red es una herramienta de modelado empírico. Basado en estas estructuras, sin embargo, esto tiene unas propiedades únicas.

El uso de la tecnología de redes neurales con datos de monitoreo desde la planta química ofrece el mejoramiento de control de calidad. Como la red es un levantamiento continuo de datos con los nuevos datos se incrementa el conocimiento del proceso, si las salidas pueden ser usadas para el sistema de control de la planta que establece las condiciones de operación para un desarrollo optimo.

Aplicando las redes neurales para la interpretación de la calidad de los datos del proceso es fijo en un estado formativo. Teóricamente, la red neural puede ser usada para convertir los datos de la planta cuantitativamente una interpretación cualitativa. Las investigaciones son hechas en el estudio de esa aplicación, a través de un extenso numero de diseño de entrada usualmente encontradas para presentar algunas dificultades en su implementacion.

Las redes neurales pueden ayudar en el diagnostico de falla del proceso. La paulatina degradación del desarrollo del proceso debido al deterioro del equipo y los disturbios o sobreestablecimiento desde el medio ambiente para guiar la desviación de una variable del proceso desde un valor normal (algunas aproximaciones) se basan en redes neurales que están usándose para el diagnostico de las causas de semejantes desviaciones.

Las detecciones de sensores de falla es una aplicación prometedora. Un modelo de diagnostico en un sistema de control puede indicar incorrectamente una falla de sensor si es una unión mal hecha entre el modelo y el proceso. Las investigaciones hechas han demostrado que en la red neural debido a la habilidad del modelo de la no-linearidad del proceso, se tiene una predicción mas adecuada de sensor a la falla.



Modelización para programas de entrenamiento de operadores, etc. La principal razón que explica la reducción del número de accidentes de aviación en los últimos años, a pesar del aumento del número de vuelos, es el empleo de simuladores de vuelo para la formación y entrenamiento de las tripulaciones aéreas. También en el campo químico, cada día se está dando más importancia a los sistemas de entrenamiento de los operadores.

Mantenimiento preventivo; localización incipiente de fallos. A medida que transcurre el tiempo, el funcionamiento de las unidades de proceso van degradándose gradualmente debido al deterioro de los equipos. Por otra parte, perturbaciones exteriores afectan negativamente al control de procesos. Ambos factores traen consigo un aumento en la variabilidad del mismo y con ello un empeoramiento de la calidad del producto obtenido.

Ligeras desviaciones de las variables respecto a su valor normal de operación ante un fallo incipiente, suelen ser contrarrestadas eficazmente por la acción de un controlador. No obstante, si este fallo no es corregido, el proceso puede verse fuertemente perturbado saliéndose de control, originando problemas en la unidad e incluso accidentes. El diagnóstico de fallo en su etapa incipiente es pues un elemento esencial en la operación de la planta.

Desde el punto de vista del mantenimiento preventivo, uno de los métodos más empleados hasta la fecha es el desmontaje de los equipos aprovechando paradas de las unidades. No obstante, parece interesante disponer de sistemas adicionales de diagnóstico cuantitativo fuera de línea.

Entre los usos de RN se tiene un equipo médico desarrollado que usa RN para detectar niveles de glucosa en la sangre al analizar valores en un detector infrarrojo y de esta manera le permite a los diabéticos monitorear su estado de salud externamente. Un equipo similar detecta la madurez de frutas al examinar externamente los niveles de azúcar en las frutas mientras todavía está en el árbol. Se desarrolló un prototipo de "nariz" electrónica que combina detectores químicos con RN y la cual tiene usos potenciales en la detección ambiental, la medicina, y la industria de la alimentación.



Igualmente el uso de análisis de detectores, las técnicas de cómputo cognitivo son utilizables ampliamente para el procesamiento de señales e imágenes.

Un sistema compuesto de RN y lógica borrosa fue desarrollado para extraer datos gráficos de documentos en papel fotografiados electrónicamente y transformar los datos a números. Otras aplicaciones de las RN en el procesamiento de señales incluye los controles de calidad acústico, identificación de fuentes de sonido, traducción automática de código Morse verbal, y la detección multi-espectral de objetivos militares y pistas aéreas.

Un RN fue desarrollada para hacer un modelo del sistema cardiopulmonar humano para ayudar en el diagnósticos de enfermedades anómalas cardiovasculares y cardiopulmonares. Usando un método similar, se desarrollo un RN para crear modelos de operación para detección y diagnósticos de fallas del motor de turbina AGT-1500 usando el tanque M1/A1 del Ejército de Estados Unidos. Un RN fue usado para generar un modelo para consumo de energía eléctrica para predicciones a corto plazo, y la lógica borrosa fue usada para crear un modelo de tipos de consumo eléctrico. Las RN también han sido usadas para crear perfiles termales de satélites y para modelar los núcleos de átomos. Los AGs han sido usados para crear modelos hidrológicos.

*Redes neurales y sistemas expertos.* Los sistemas expertos son un grupo dentro del procesamiento simbólico que tuvo un tremendo crecimiento en los últimos 14 años. Para problemas que surgen suscitan el desarrollo de un sistema experto, estos sistemas tienen éxito y tienen que proporcionar esos valores o méritos. Sin embargo, los sistemas expertos no pueden resolver todos los problemas y las redes proporcionan una alternativa efectiva.

La red probablemente no puede remplazar a los sistemas expertos. Instalados los dos sistemas pueden adecuarse para complementarse con otros. La respuesta de cuando o como debe primero fundamentarse en la naturaleza de la solución del problema.

Cuando un problema surge, la experiencia del ingeniero puede instantáneamente diagnosticar las raíces o causas y las correcciones recomendadas. Estos no requieren de un análisis extenso o deducciones y razonamiento; éstos simplemente conocen la respuesta y son frecuentemente correctas. Este tipo de modos de solución problema es



donde los ingenieros están operando por principios de reconocimiento de patrones. Basado en la respuesta del patron o modelo, estos generan rápidamente remedios espontáneos con pocos o sin esfuerzos consistentes.

Sin embargo, estas respuestas rápidas de la aproximación de la solución del problema alguna veces falla. En estos casos, los ingenieros cambian a un análisis mas detallado. Estos análisis requieren de más datos y más tiempo pero al final frecuentemente los resultados son favorables.

Interés en la aplicación de la red neural para el proceso de ingeniería tiene que incrementarse en la pasada década. La técnica tiene que ser usada para desarrollar el modelo del reactor y el modelo dinámico para control. Unas redes muy pequeñas tienen un aprendizaje fácil y sucesivamente son simuladas para el desarrollo de los reactores agitados.

Para redes extensas y procesos mas complejos, el procedimiento puede ser muy laborioso y de computación intensiva. Debido a que las redes neurales son capaces de manejar grandes volúmenes de datos, esto son empleados para examinar los datos del sensor que ofrecen la adquisición con datos de computadora (sistemas de adquisición para identificar fallas y separa las señales de ruido).

Una de las potencias o poder de las tecnologías de la inteligencia artificial es su flexibilidad de ser adaptadas a aplicaciones específicas. La capacidad de los sistemas expertos para proporcionar una interfaces de uso favorable y su flexibilidad en el acceso de datos desde fichas auxiliares hechas es un excelente frente final de el trabajo de la red neural. Esto, acoplado con el sistema experto habilita a proporcionar una interpretación de el análisis que puede hacer a esos sistemas muy atractivos. La implementación sucesiva como un requerimiento híbrido de tres distintos pasos. Primero el sistema experto colecta los datos necesarios. Siguiendo, la red neural analiza estos datos. Después el sistema experto retira o consigue una conclusión desde el análisis. Sin embargo, estos datos son muy intensivos y requieren un extenso establecimiento del adiestramiento de datos. El acercamiento de el sistema puede disminuir bajo tiempos fuera del periodo de entrenamiento usado para establecer datos expandidos, esto últimamente puede afectar el valor umbral usado en la lógica del sistema experto y resultar una conclusión invalida.



Las redes neurales tienen declarados usos en numerosas áreas. Estos sirven como herramientas de modelado numérico dentro de un control de proceso inteligente. Cuando se combina con el procesamiento de información simbólica, estas funcionan como soporte del sistema experto tradicional. Dentro de este rol, la operación efectiva de la red neural opera como un convertidor de símbolos a números o números a símbolos. Finalmente, la red neural actúa como una herramienta única para diagnóstico de falla de proceso.

### *CONCLUSIONES:*

Las redes neurales pueden desarrollarse por muchos caminos por el uso efectivo de las redes, donde las entradas y salidas pueden incluir todas las condiciones significativas o por el desarrollo característico del modelo interno desarrollado por la red donde adecuadamente se describe el proceso físico que pueden ser desarrollados desde principios fundamentales como masa, energía, momentum u otros principios de la ingeniería química. Y siempre es esencial checar la validez del modelo interno con la confirmación por medios experimentales o ensayos en plantas piloto.

Aunque la red neural tiene algunas ventajas, esto no es una panacea. Antes de abordar un proyecto de redes neurales es prudente conocer ventajas y desventajas de aplicar la red a ese problema. Desafortunadamente cuando se leen reportes publicados sobre el uso de redes, los autores tienden a enfatizar las ventajas mientras que disminuyen algunas de las limitaciones y problemas asociados. Por esa razón es recomendable lograr un buen conocimiento de la red a través de la experiencia sobre el esfuerzo mínimo de costo inicial para la investigación. Sin embargo, este esfuerzo de experiencia puede mejorar el acercamiento apropiado de la red para una aplicación específica.

Las redes neurales ofrecen algunas ventajas distintas sobre otras formas de computación, incluyendo aspectos de la inteligencia artificial y el modelado tradicional. El ingeniero prudente debe conocer ambos. Si sola se alimenta una red se pueden tener sorpresas y un impacto que permanece así por no haber tomado precauciones frente al optimismo excesivo. Esto es que un número de problemas prácticos con la red deben ser dominados antes de que pueda ser extendido completamente para su uso. Con respecto a la ingeniería la red está en sus principios y el desarrollo está solamente siendo proporcionado por el uso y limitaciones encontradas en el tratar de resolver problemas prácticos.



Incrementado el uso de las computadoras en paralelo y la programación orientada a objetivos se intenta promover el desarrollo de software de las nuevas redes neurales y hacer una aplicación fácil, menos expansiva y mas practica. Para 2001, se espera un incremento en el desarrollo y aplicaciones en el banco industrial. Las redes neurales, sin embargo, pueden no extender su uso debido al costo de la computadora por no posibilitar la baja suficiente para una aplicación practica y de mas entendimiento y experimentación.



**CAPITULO 9.****LOGICA  
DIFUSA.**

Muchas tareas de toma de decisiones y de solución de problemas son demasiado complejas para ser comprendidas cuantitativamente, pero las personas triunfan al usar conocimientos que son imprecisos en vez de precisos.

La teoría de grupo difuso, originalmente introducida por Lofti Zadeh en la década de 1960, aparenta el razonamiento humano en su uso de información aproximada e incertidumbre para generar decisiones.

Esta teoría fue generada específicamente para representar matemáticamente la incertidumbre y vaguedad y proveer de herramientas formalizadas para enfrentar las imprecisiones intrínsecas en muchos problemas. Para contrastar, las demandas de cómputo tradicionales requieren precisión en cada detalle. Como los conocimientos pueden ser expresados de una manera más natural al usar grupos difusos, muchos problemas de ingeniería y decisión pueden ser simplificados.

Dentro de lo que se considera estrategias de control avanzado se puede colocar el intento de incorporación de una lógica de ambigüedad, que utiliza funciones de conformidad asociadas a los atributos de reglas de control formuladas por medio de expresiones lingüísticas que proponen soluciones a determinados problemas de control aún no resueltos con otra técnica.



La teoría de grupo difuso crea clases o grupos de datos con fronteras que no están definidas específicamente (son difusas). Cualquier metodología o teoría que implementa definiciones precisas, tales como los grupos de teoría clásica, aritmética y programación, pueden ser "difusos" al transformar el concepto de un grupo preciso a uno difuso con fronteras difusas.

El beneficio de extender la teoría y métodos de análisis precisos a las técnicas difusas es la fortaleza que puede ser usada para resolver problemas de la vida real, los cuales inevitablemente conllevan a algún grado de imprecisión en las variables y los parámetros medidos y/o procesados, al ser usados.

De la misma manera, las variables lingüísticas son un aspecto crucial de algunas aplicaciones lógicas difusas, donde los términos generales tales como "grande", "mediano" y "pequeño" son usados para captar una gran variedad de variables numéricas. Mientras que es similar a la cuantificación convencional, la lógica difusa le permite a estos grupos estratificados cubrir las mismas áreas (por ejemplo, un hombre pesa 85 kilogramos puede ser clasificado en las categorías "grande" o "mediano" con grados variados para pertenecer o ser miembro de cada grupo).

La teoría de grupos difusos consiste de la lógica difusa, la aritmética difusa, la programación matemática difusa, la topología difusa, y el análisis difuso de datos, pero el término de lógica difusa puede ser utilizado para describir a todos éstos.

La lógica difusa emergió a las vías principales de tecnología informática a finales de la década de los 80's y principios de los 90's. La lógica difusa parte de la lógica clásica de Boole al implementar variables lingüísticas en una variedad de valores reales, los cuales permiten la definición de valores intermedios entre binarios convencionales.

La teoría de lógica difusa es un proceso semejante a la decisión humana en donde se usa la aproximación de la información para generar una decisión.



A menudo, esta lógica puede ser considerada como un supergrupo de lógica Booleana o específica en la misma manera que la teoría de grupo difuso es un super grupo de la teoría de grupo convencional. Como la lógica difusa puede manejar información aproximada de manera sistemática, es ideal para controlar sistemas no lineales y para modelar sistemas complejos donde existe un modelo inexacto o donde son comunes la ambigüedad o la vaguedad.

En control difuso, las estrategias de control son desarrolladas en términos de reglas imprecisas que relacionan el valor de las mediciones de las variables que planean ajustarse de las variables manipuladas. La figura 9.1. y 9.2. son un bloque ilustrativo de el contraste entre un modelo convencional de sistema basado en modelo y un control de lógica difusa. Las mediciones de sistemas convencionales en una señal precisa del proceso y la aplicación del modelo matemático y un algoritmo de control basado en un modelo. El control de lógica difusa, es la otra mitad, realiza un conocimiento en su forma de reglas que describe el comportamiento del sistema.

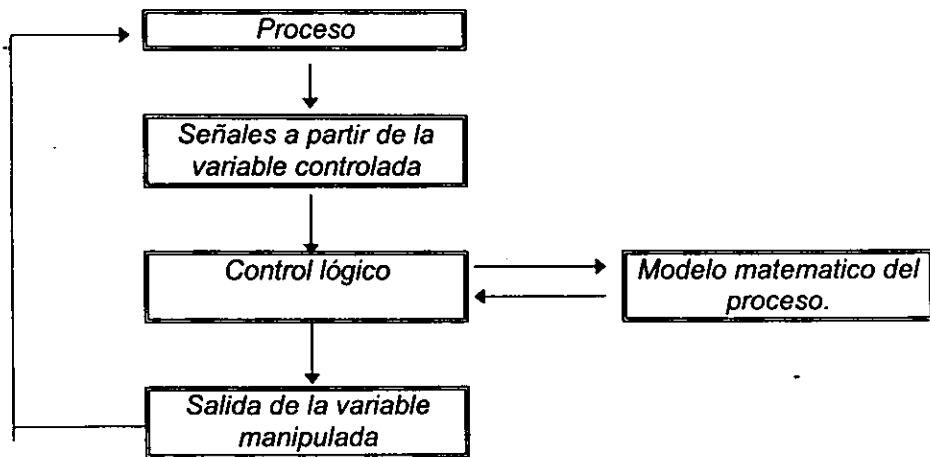


Fig. 9.1. Control convencional de modelo base

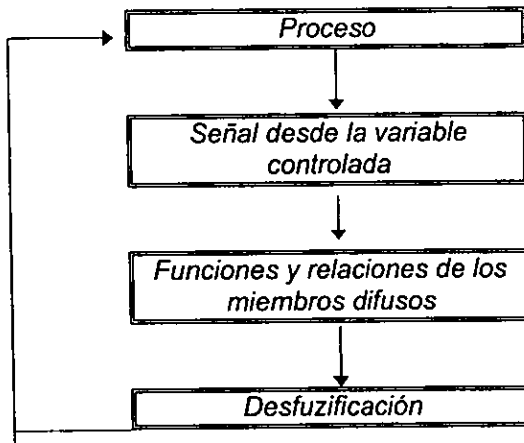


Fig. 9.2. Control con lógica difusa.

Esas reglas y sus funciones asociadas a los miembros deben ser desarrolladas desde un firme conocimiento del proceso. La lógica difusa es una alternativa de control donde el modelo matemático del proceso no es conocido o es demasiado complejo su desarrollo. La salida del control de lógica difusa es determinada por un proceso llamado "desfuzificación". Esto convierte la salida de las reglas asociadas en un simple valor numérico que es usado en el control de la variable manipulada.

Un sistema difuso típico consiste de una base de reglas, funciones de membresía, y procedimiento de deducción. Hoy en día la lógica difusa se encuentra en una variedad de usos de control, incluyendo el proceso de control químico, la manufactura, y en tales productos como las máquinas de lavar, las cámaras videomagnetofónicas y los automóviles.

Los esquemas de representación de conocimiento, asumen que el conocimiento puede ser representado como falso o verdadero. Sin embargo, en el mundo real que es menos ideal o incierto, debido a que no todos los hechos disponibles, premisas, reglas, etc. son absolutamente falsas o verdaderas, solo algo posible, mas probable o en el tipo puede ser mas frecuentemente, etc. Lo incierto de los hechos, reglas y las hipótesis pueden llegar desde:



- Información no segura almacenada, debido al imperfeccionamiento del dominio del conocimiento o hechos no seguros, o que sean el resultado de afinaciones desde observaciones no reales, mediciones inexactas, mala interpretación de los resultados y de características.
- Información azarosa implicada.
- Información incompleta usada para la generación de nuevos conocimientos.
- Efecto de agregación de conocimientos debido a el uso de diferentes fuentes de información (libros, dos o mas expertos), o debido a la heurística.
- Inexactitudes inherentes al lenguaje representado.

Aparte del conocimiento incierto del origen del conocimiento, el problema general llega en: ¿Cómo podemos conocer la incertidumbre para representarla?. Un camino es delinear la incertidumbre en una extensión del espacio entre verdadero y falso para introducir algún valor intermedio entre el intervalo, usualmente algunos valores entre uno como el valor verdadero y 0 como el valor falso. Ahora algunos valores entre 1 y 0 son interpretados como un grado de verdad por compararlos con el 1 de la verdad absoluta. Esto reemplaza la probabilidad (o densidad de probabilidad) de los valores en estadística, situado en lo incierto ( el 0 ) y lo cierto ( el 1 ). Por ejemplo el valor de 0.75 implica que el hecho concerniente es 75% verdadero o probable.

La lógica difusa es una herramienta capaz de realizar el control supervisorio automático debido a que permite la estrategia de operación humana para ser transformada directamente en una solución. La realidad es que la lógica difusa produce un resultado repetido exacto para cada conbinación posible de las condiciones de entrada. El nivel de aceptación puede mejorarse mas en la comunidad de ingenieros debido al mito de esa tecnología.

El control difuso es expresado lógicamente usando reglas de lingüística simple y es ideal para formulaciones del conocimiento experto, y la incorporación de los valores intuitivos. Es trasladado para el fácil conocimiento del nivel de operación de la maquina, en tiempos de designación cortos para prototipo y para un simple ajuste de controles.



El análisis de estabilidad esta fijado más complejamente por la lógica difusa debido a que en muchos casos esta aplicada en los sistemas no lineales. Los expertos humanos usan procedimientos parecidos a la lógica difusa muy lejanos de demostrar el control estable de ciertos problemas. Es muy duro de considerar los productos en la realidad que están usando tecnología de lógica difusa. Cada aplicación sucesiva de la lógica difusa es una confirmación de ese trabajo de tecnología, si es propiamente usado.

En la lógica difusa o de variabilidad gradual, a la idea de los estados absolutos de la lógica binaria representada por el 1 (concepción maximista del todo o absoluta conformidad) y por el 0 (concepto maximista de la nada o absoluto desacuerdo), se añade un intervalo de ambigüedad entre los dos absolutos, que valorado cuantitativamente y de manera adecuada para cada caso permitirá tratamientos de esta ambigüedad encaminados a la obtención de salidas de control concretas.

La salida al aplicar a los objetivos este tipo de lógica no es el resultado de una ley u operación lógica llevada a cabo sobre las variables discretas 0 y 1, sino una magnitud cuantitativamente definida y variable, asociada a los diferentes grados de conformidad de una serie de proposiciones que incluyen expresiones de ambigüedad en forma de reglas de control, entendiendo por proposición, tal como se utiliza en la conversación ordinaria, cualquier expresión que comunique una información cualquiera teniendo en cuenta que las leyes son expresiones de cálculo, mientras que las reglas son, por lo contrario, expresiones sobre las expresiones de cálculo.

Los términos para definir determinadas ambigüedades son numerosos y así escuchamos normalmente: "hace un poco de frio", "ese lugar es distante", "el coche circulaba rápido", etc. y; en muchos casos estas expresiones de ambigüedad (un poco, distante, rápido, etc.) forman parte de construcciones verbales más complejas: "si la longitud de la llama es corta, abrir un poco más la válvula de combustible".

La forma inicial de una proposición ambigua no viene representada por medio de una expresión matemática, sino a través de una verbal que habrá de ser objeto de una valoración que refleje de manera cuantitativa el grado de conformidad que una situación dada y medible tiene con respecto al atributo ambiguo considerado.



Los procedimientos que pueden seguirse para establecer las funciones de conformidad, así como las representaciones gráficas que pueden adoptarse son numerosos, si bien es aconsejable en todos ellos el seguir una metodología que pasaría por los siguientes puntos :

- Redacción de las proposiciones representativas del concepto que se pretenda introducir y sus escalas.
- Prueba de cada una de estas escalas para contrastar si representan adecuadamente las proposiciones.
- Establecer un procedimiento de valoraciones de la escala fundado en conocimientos fruto de la experiencia.
- Comprobar la escala en toda su amplitud para verificar su validez y fiabilidad.

*Avances y ventajas de la lógica difusa:*

- no requiere de modelos matemáticos complejos en su construcción,
- utiliza lenguaje natural,
- es fácil de realizar,
- proporciona resultados con buen acercamiento,
- es la fuente de tareas dentro de la combinación con otras técnicas.

Un sistema de lógica difusa es similar a un sistema experto convencional basándose en reglas, excepto que contiene reglas con relaciones imprecisas y los miembros de las funciones asociadas con esas reglas difusas. Como un control difuso, el sistema experto debe incorporar la técnica de desfuzificación necesaria para interpretar las entradas y la asociación de los miembros de funciones y el traslado sobre una salida específica, o conclusión. Por ejemplo, si el conocimiento es representado en reglas donde los antecedentes y consecuencias son difusas o mejor dicho imprecisas, un establecimiento de Si, donde las reglas pueden verse como sigue:

Si temperatura = moderada y presión = baja  
entonces escasamente se tiene un incremento de calor.



Si temperatura = baja y presión = baja  
entonces extensamente se incrementa el calor.

Si temperatura = alta y presión = moderada  
entonces escasamente se reduce el calor.

El significado de esa estructura de reglas es que una aplicación práctica y precisa de mezcla de entradas y salidas no es necesaria. Esto hace la simplificación basada en reglas difusas y mas intuitiva. Si es importante, sin embargo, la función de los miembros de alto, moderado y bajo incremento y el deseo de una cuidadosa definición. Al mismo tiempo, esto requiere el procedimiento del ensayo y error y construcción sobre el conocimiento empírico de los expertos humanos.

### Propiedades:

1. Técnica matemática para cuantificación cualitativa de las variables, funciones y pasos.
2. Manejo lingüístico; esto es computación con palabras, por ejemplo, caliente, frío, tibio, fresco, etc.
3. Conocimiento expresado en una fuente o camino mas natural por uso de variables lingüísticas que son descritas por armaduras o instalaciones difusos.
4. Si una persona puede describir el proceso, se puede ofrecer la implementación de un sistema experto.

La lógica convencional establece categorías bien definidas mientras que en la lógica difusa utiliza los conjuntos difusos en donde se tienen varias categorías.

### Uso apropiado de lógica difusa:      Uso inapropiado de lógica difusa:

MODELADO; para modelado de sistemas muy complejos o procesos no lineales donde no existen modelos matemáticos simples .

CONTROL; para procesos altamente no lineales.

CONTROL; cuando se puede resolver fácil y adecuadamente alrededor del modelo matemático existente.

CONTROL; el proceso es lineal (cuando usa control PID) y la teoría de control convencional produce un resultado satisfactorio.

DECISIÓN; cuando los procesos lingüísticos son formulados por conocimientos expertos.

DECISIÓN; cuando los procesos pueden ser descritos con palabras.





**FUNCIÓN DE CONFORMIDAD.** Cuando se introduce la ambigüedad al hablar de una velocidad, se utilizan términos como "rápido" o "lento", en lugar de expresiones numéricas. Ahora bien dentro de la ambigüedad "rápida", es cierto que habrá una mayor conformidad con el término para unas velocidades que para otras, conformidad que podrá representarse por un factor comprendido entre 1 (conformidad absoluta) y 0 (cuando se da ausencia total de conformidad), que no va a ser una relación fija, sino que dependerá de los propósitos hacia los que esté orientada la formalización de la ambigüedad. Es decir, que a diferencia de la lógica convencional en la que el valor verdadero sólo puede ser 0 ó 1, en la lógica difusa puede tomar cualquier valor entre cero y uno.

Así, en unos casos, a una velocidad de 50 km/h podrá ir asociado un factor de conformidad con respecto al atributo de velocidad "rápido" de 0.8 mientras que en otros casos, a esa velocidad de 50 km/h podrá corresponderle un factor de conformidad de 0.3 con respecto al mismo atributo.

La importancia que tiene determinar óptimamente la función de conformidad es consecuencia de la manera en la que esta lógica de la intensidad se introduce en los objetivos de control de determinados procesos industriales, como alternativa a los algoritmos de control PID (Proporcional Integral Derivativo) en uso, al estar en presencia de procesos que presentan características no lineales que no pueden controlarse por medio de expresiones de control simples, o en aquellos en que para su operación hayan de tenerse en cuenta tantas condiciones, que habitualmente se conducen de manera manual.

Un algoritmo PID es la formulación matemática de la respuesta del lazo de control a una determinada entrada (error o diferencia entre la variable de proceso y el punto de consigna). Cuando se introduce la lógica de intensidad en las tareas de control, se hace, mediante la formulación de reglas de control.

Esas reglas se introducen utilizando términos ambiguos para los que se hace necesaria la determinación de los factores de conformidad que al incorporarlos en las reglas de control proporcionen una o varias salidas cuantificadas de manera inequívoca que pueden actuar eficazmente sobre los elementos finales de control.



En general, las funciones de conformidad se representan utilizando en las ordenadas una escala de 0 a 1, y en las abscisas los valores medibles de la variable para la que se ha establecido el atributo de ambigüedad, bien en sus expresiones numéricas absolutas o en escalas normalizadas.

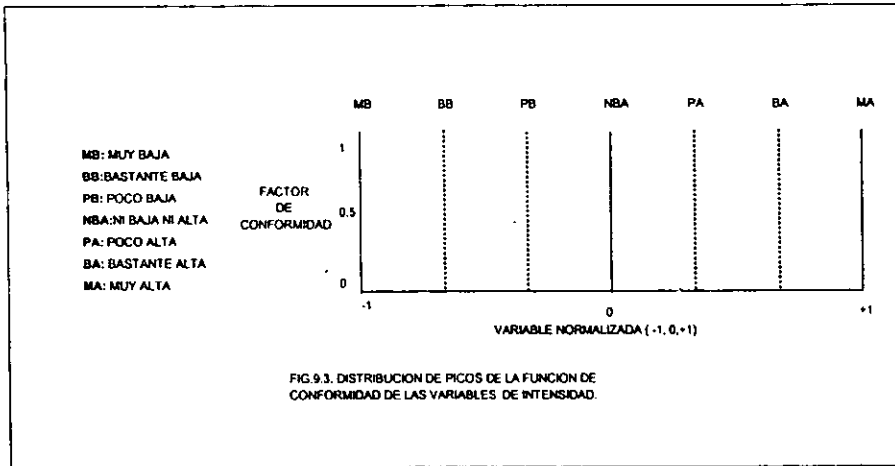
Las escalas del eje de abscisas puede normalizarse con valores de 0-100 %, etc., si bien es más práctico hacerlo para valores de -1 a +1, ya que en muchas ocasiones la ambigüedad viene representada por un término que puede tener la misma connotación en cuanto a grado de conformidad cuando los valores son positivos que cuando los valores son negativos (por ejemplo, si la posición es distante de ...”).

Usualmente, el intervalo de valores (-1, +1) es cambiado para representar todos los valores de verdaderamente falso (-1), vía desconocida (0) y completamente cierto (+1). En este contexto los hechos ciertos o inevitables no son idénticos a la probabilidad o densidad de probabilidad como se representa en la gráfica. Estos son definidos, calculados y usados en un camino completamente diferente.

Cuando la selección de los valores de sucesos seguros en el intervalo (-1,0,+1), los valores negativos simplemente pretenden el predominio de la evidente oposición para una regla de verdad, puesto que el valor positivo indica el predominio de evidencias concordadas.

Para una variable concreta, es conveniente establecer una serie de expresiones ambiguas, todas ellas referidas a un mismo atributo y ordenadas según una valoración simétrica en torno a una expresión central de ambigüedad que se considera como neutra, y así poder introducir la ambigüedad de una temperatura repartida de la siguiente manera:

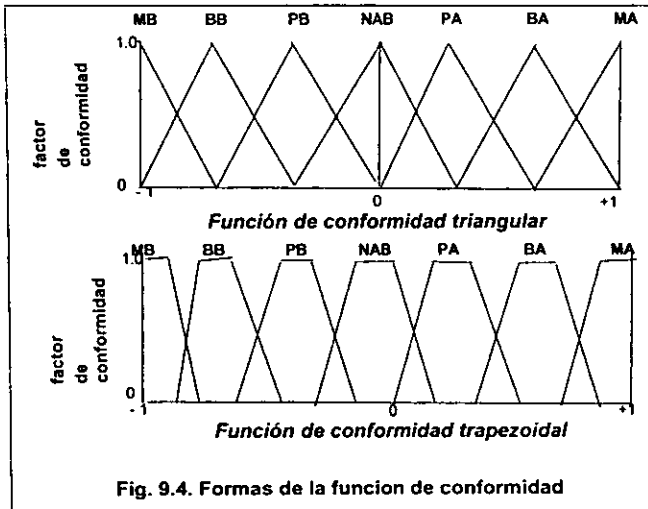
- Muy alta (MA).
- Bastante alta (BA).
- Poco alta (PA).
- Ni alta ni baja (NAB).
- Poco baja (PB).
- Bastante baja (BB).
- Muy baja (MB).



Cada una de estas expresiones (MA, BA, PA, NAB, PB, BB, y MB) son denominadas como variables de intensidad del atributo de ambigüedad propuesto y las cimas de sus representaciones de conformidad se sitúan distribuidas proporcionalmente a lo largo del intervalo normalizado del eje de abscisa. (Fig. 9.3)

No existe una regla fija en cuanto al número de variables de intensidad que pueden definirse para expresar la ambigüedad de una variable física, e incluso la tentación de realizar una partición minuciosa es grande, es preferible establecer pocas variables de intensidad, pero bien definidas (por ejemplo 5 o 7), y evitar así la complejidad que una partición más pormenorizada añadiría al poner en juego un mayor número de combinaciones posibles.

En cuanto a la forma de la función de conformidad de estas variables de intensidad, aun cuando lo más apropiado sería la de una representación normal o campana de Gauss, para los propósitos prácticos de inferencia del factor de conformidad se tiene en cuenta que representaciones más simples, como pueden ser las triangulares y trapezoidales, aproximan bastante los resultados a los que se obtendrían con representaciones más complejas y hacen que los cálculos sean menos complejos (fig. 9.4).



Las variables de intensidad pueden establecerse en una regla de control tanto para la premisa como para la conclusión, pero no tienen porque ser definidas en cuanto a su formulación y número.

#### DETERMINACIÓN CUANTITATIVA DE LA CONFORMIDAD.

En la practica, las reglas de control de la lógica de intensidad se formulan bajo expresiones verbales organizadas. La expresión "Si la longitud de la llama es corta, entonces se debe abrir un poco el gas" puede escribirse abreviadamente:

Si VP = corta  $\Rightarrow$  FCV = un poco más abierta.

En la que "Si VP = corta" es la proposición antecedente o premisa y "FCV = un poco mas abierta" es la proposición consecuente o conclusión, y cada una de esas proposiciones con un grado de conformidad asociado a VP y FCV.

Ahora bien, una regla de control puede estar formulada por mas de una proposición, tanto en la sección antecedente como en la consecuente, y en cada caso estas proposiciones formuladas a partir de variables de entrada y/o salida relacionadas mediante funciones lógicas del tipo Y (and), O (or), etc.



En el caso de que dos ó más proposiciones formulen la premisa, sería necesario determinar el grado máximo de conformidad conjunta asociado para utilizarlo como factor de reducción o deformación en la función de conformidad de la salida constituida en conclusión.

Para llevarlo a cabo, pueden seguirse criterios diferentes:

a) En el caso de una combinación lógica del tipo "Y":

- Utiliza un factor de conformidad más bajo entre los de las proposiciones que configuran la premisa.
- Utiliza un factor de conformidad que sea el producto de los factores de conformidad de las diferentes proposiciones que configuran la premisa.

b) En el caso de una combinación del tipo "O":

- Utiliza el factor de conformidad más alto entre los de las proposiciones que configuran la premisa.
- Utiliza un factor de conformidad que sea la suma menos el producto de los factores de conformidad de las diferentes proposiciones que configuran el problema.

De igual manera, cuando exista mas de una regla de control en la que la conclusión deba actuar sobre el mismo elemento final de control, será necesario, una vez obtenidas las deformaciones de la función de conformidad de las conclusiones de las distintas reglas de control, combinar aquéllas que se relacionen con un mismo elemento de control, con el objeto de conseguir una función de conformidad única para la conclusión, pudiéndose adoptar dos criterios diferentes:

◇ Tomar una función de conformidad para la conclusión, la función de conformidad de la proposición que presente la conclusión de cresta más elevada.

◇ Utilizar como función de conformidad para la conclusión la función suma de las funciones de conformidad obtenidas para las distintas conclusiones que se refieren al mismo elemento de control.



Una vez determinada la función de conformidad para el elemento final de control, el valor de la salida se establece por cualquiera de los métodos de centro de gravedad, mediana o promedio ponderado de las funciones de conformidad combinadas.

Cuando la determinación del valor de salida para el elemento final de control es el resultado de un promedio ponderado, se utiliza como factor de ponderación el grado de conformidad que se tiene en cuenta en la premisa.

**AJUSTE DE LAS FUNCIONES DE CONFORMIDAD.** Para una clase que ha sido obtenida mediante una determinada partición, puede suceder a veces que los atributos escogidos se utilicen de una manera tan vaga en su formulación que se haga necesario establecer alguna regla que determina dónde termina una clase y dónde empieza otra.

El ajuste de las funciones de conformidad de las variables de intensidad establecidas consiste en la determinación de las coordenadas correspondientes a los valores de conformidad 0 y 1, para cada una de ellas en el eje de abscisas. El número de coordenadas que será necesario calcular dependerá de la forma final que se haya decidido para las funciones de conformidad.

- ✦ Para formas triangulares ( 3 por el número de variables de intensidad ) menos 2.
- ✦ Para formas trapezoidales ( 4 por el numero de variables de intensidad ) menos 4.

Es obvio que cuanto mayor sea el numero de variables de intensidad y más sofisticadas las formas de las funciones de conformidad, la complejidad de los cálculos aumentará considerablemente y podría requerir la utilización de ordenadores potentes para su determinación, lo que alejaría de los objetivos de simplicidad propuestos cuando se trata de incorporar la lógica de intensidad a los objetivos de control multivariable, por lo que será conveniente ingeniarse formas simples para las funciones de conformidad, como, por ejemplo, triángulos, que permitan llevar a cabo el ajuste de las funciones de conformidad, de las distintas reglas de control mediante procedimientos de "prueba y error", a partir de una función de conformidad inicial que puede obtenerse de la observación del comportamiento de operadores expertos cuando operan en manual.



¿Por que la lógica difusa? Se puede establecer un sistema difuso para un mismo propósito de establecimiento de un sistema de computación para mapeo de entradas a salidas. Básicamente consiste de tres estados:

- fuzificación; es un proceso que combina valores actuales (por ejemplo, presión barométrica) con datos almacenados de la función de membresía para producir un valor de entrada fuzificado.
- reglas de evaluación; o llamada de inferencia difusa, es el camino para producir respuestas numéricas desde reglas basadas en la lingüística sobre los valores de entrada del sistema.
- desfuzificación; un sistema fuzificado combina todas sus salidas y obtiene un numero representativo. Se puede correr la maquina en una variable del contexto, si el numero no ajusta para tener una buena solución, el ajuste de los parámetros del sistema solamente puede desarrollarse en una conclusión satisfactoria. Cada una de las reglas de una maquina difusa es mas compleja como un concepto general que pertenece al mismo.

El procedimiento de lógica difusa consiste en el análisis y definición del problema, creando el establecimiento y relaciones lógicas convirtiendo su información en lo que se ha dado en llamar establecimiento difuso y la interpretación del modelo. Se pueden utilizar un numero de criterio para determinar cuando una aproximación de lógica difusa puede aprender por si misma para poder resolver el problema especificado. Este prerequisite incluye el nivel de ambigüedad de los datos (determinados matemáticamente) y el requerimiento de acercamiento de la salida.

Para utilizar un modelo de la lógica difusa:

- Analizar el problema, hacer seguro el conocimiento completo.
- Definir el problema para identificar las funciones de membresía (por ejemplo, el grados de inclusión dentro del establecimiento prescrito).
- Convertir el lenguaje del problema dentro de una regla.



- Establecimiento de un procedimiento apropiado para fuzificación y procesamiento del problema.
- Aprendizaje para la interpretación del modelo evaluando los resultados.
- Ajuste fino de los resultados si estos son inapropiados o inadecuados.

Debido a que el desarrollo de los cálculos y la construcción del modelo pueden hacerse seguros con un modelo difuso en un camino apropiado para distribuir el problema. Si se sustituye otro modelo, puede encontrarse que no puede conocerse o evaluarse los resultados.

Ejemplo de control con lógica difusa: con el modelo lingüístico basado en la experiencia del operador de forma cualitativa podemos observar el siguiente ejemplo donde se desarrollara por pasos:

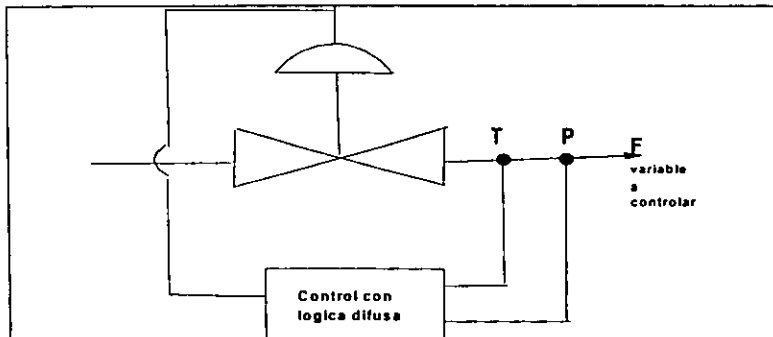


fig. 9.5. Control de una válvula con lógica difusa

1) Definir conjuntos difusos de variables de entrada a salida. Se escogen tres conjuntos difusos y la gama de valores que cada uno abarcara se selecciona dependiendo del operador (de 2 a 10). La cantidad de memoria que requiere el algoritmo aumenta porque la información es mayor para la base de conocimiento.



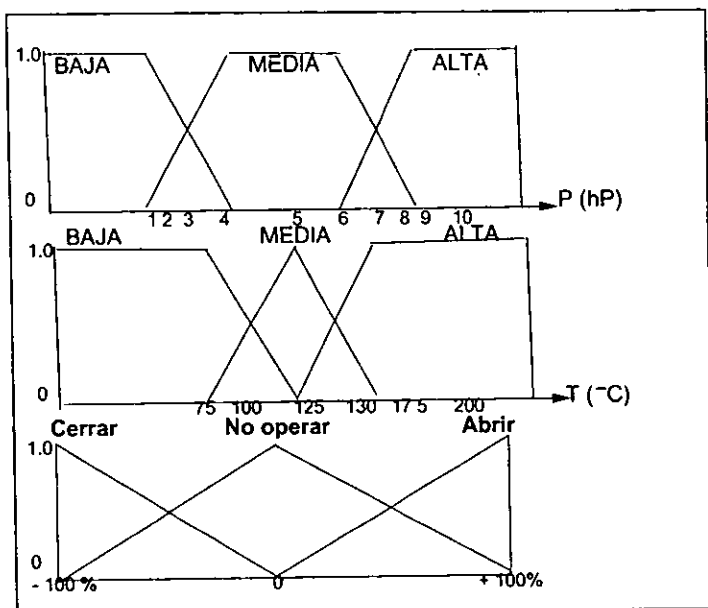


Fig.9.6. Tres conjuntos difusos: dos variables de entrada y una variable de salida.

2) Buscar las reglas (que son llamadas sentencias) o las combinaciones de los conjuntos. Esto es lo mas complejo del sistema, y la parte mas crucial e importante del proceso.

*Como un control modulante.*

Sentencias: "Si... entonces..."

Numero de reglas = producto cartesiano del numero de particiones de entrada de los dos conjuntos = 3 conjuntos x 3 variables

- $R_1$  = Si P es baja y T es baja entonces abrir válvula.
- $R_2$  = Si P es baja y T es media entonces abrir válvula.
- $R_3$  = Si P es baja y T es alta entonces no operar para mantener el equilibrio.
- $R_4$  = Si P es media y T es baja entonces abrir válvula.
- $R_5$  = Si P es media y T es media entonces no operar la válvula.
- $R_6$  = Si P es media y T es alta entonces cerrar la válvula.
- $R_7$  = Si P es alta y T es baja entonces no operar la válvula.
- $R_8$  = Si P es alta y T es media entonces cerrar la válvula.
- $R_9$  = Si P es alta y T es alta entonces abrir la válvula.



3) Tiene que ver con el funcionamiento del control y es donde se requiere al operador experto en la forma cualitativa del proceso.

Se puede dar un valor a la temperatura y presión; estableciéndose así un objetivo o blanco y se busca así el mayor acercamiento arriba o abajo dependiendo de la difusión.

señales deterministas:  $\left\{ \begin{array}{l} P = 7 \text{ hPa} \\ T = 150^\circ \text{ C} \end{array} \right.$

*fusificación de un valor determinístico*: el proceso de emborronamiento o difundir sobre el conjunto difuso, el punto objetivo para definir grados de membresía o contribución en cada conjunto.

Para  $P = 7 \text{ hPa}$ , la fusificación o membresía de este valor determinístico de entrada es:  $\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ baja} \\ 0.67 \text{ media} \\ 0.33 \text{ alta} \end{array} \right.$

Para  $T = 150^\circ \text{ C}$ , la fusificación o membresía de este valor determinístico de entrada es:  $\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ baja} \\ 0.5 \text{ media} \\ 0.5 \text{ alta} \end{array} \right.$

4) Buscar que valores se activan o desactivan con las reglas. Y se busca el evento en las reglas que quedan activas:

$P_{\text{fuzificada}} = 0.67_{\text{media}}, 0.33_{\text{alta}}, 0.0_{\text{baja}}$   $\rightarrow$   $R_5, R_6$

$T_{\text{fuzificada}} = 0.5_{\text{alta}}, 0.5_{\text{media}}, 0.0_{\text{baja}}$   $\rightarrow$   $R_8, R_9$

5) Método de teoría de conjuntos de intersección y unión; se escoge un valor mínimo en cada uno de los conjuntos.

*composición submínima*: fundamentado en la teoría de conjuntos difusos, para decidir se elige el valor mínimo de los dos valores  $P, T$ .

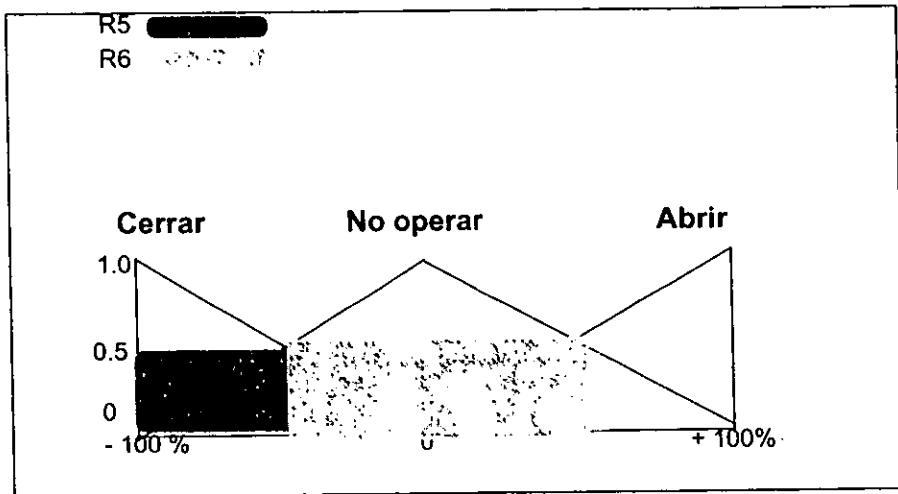
$R_5 = (P_{\text{media}}, T_{\text{media}})$   $\rightarrow$   $A_5 = (0.67, 0.5)$   $\circ$   $\circ$   $\circ$  valor mínimo 0.5  
 $R_6 = (P_{\text{media}}, T_{\text{alta}})$   $\rightarrow$   $A_6 = (0.67, 0.5)$   $\circ$   $\circ$   $\circ$  valor mínimo 0.5  
 $R_8 = (P_{\text{alta}}, T_{\text{media}})$   $\rightarrow$   $A_8 = (0.33, 0.5)$   $\circ$   $\circ$   $\circ$  valor mínimo 0.33  
 $R_9 = (P_{\text{alta}}, T_{\text{alta}})$   $\rightarrow$   $A_9 = (0.33, 0.5)$   $\circ$   $\circ$   $\circ$  valor mínimo 0.33



6) Se pasan a los conjuntos de salida:

$R_5$  = afecta a la variable de salida, no opera y el resultado es el conjunto

$R_6$  = conjunto cerrado por 0.5 da por resultado el conjunto

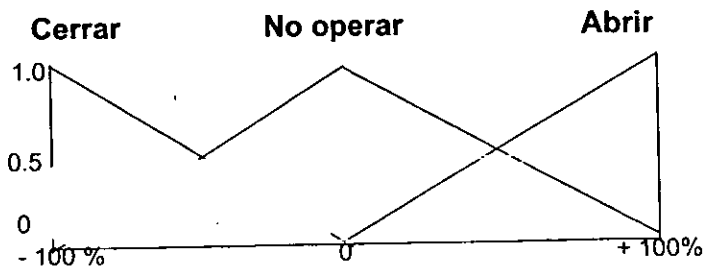


$R_8$  = cerrar la válvula para 0.33, da por resultado el conjunto

$R_9$  = cerrar la válvula para 0.33, da por resultado el conjunto

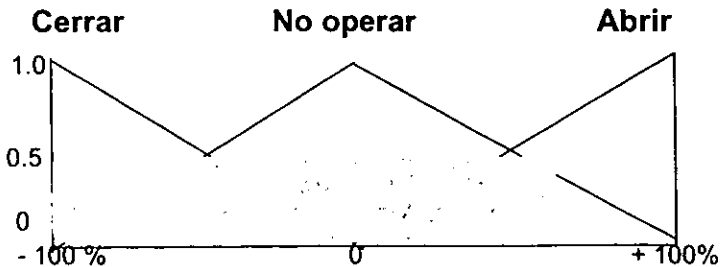
R8

R9





7) Unión de los conjuntos generados: conjunto difuso de salida es la salida de control en forma difusa.



8) Métodos de desfuzificación:

1) 1<sup>er</sup> máximo (sencillo pero es el menos preciso). Que encuentra el conjunto de salida difuso y observa cual es el valor.

Para 0.5  $\rightarrow$  - 100 % (cerrar la válvula un 100 %)

2) Encontrar el valor medio de ese máximo.

Para 0.5  $\rightarrow$  - 0.25 % (cerrar la válvula un 25 %)

3) Encontrado el centro de área de la curva a través de las integrales.

$$\text{Punto de área de la curva} = \frac{\sum \text{momento de área}}{\text{momento de área}} = -12.5 \%$$

Para 0.5  $\rightarrow$  - 12.5 % (cerrar la válvula un 12.5 %)

para ese valor de salida se observa que es un método mas exacto, requiere mas capacidad de cálculo y compromiso con la memoria. Todo este proceso es una sola inferencia y se tiene un chip de 5 millones de inferencias en un segundo. También es conveniente recordar que el granular mas el conjunto será mas fino el control.

Como otro ejemplo se presenta el siguiente caso: rango de membresía que cubre parcialmente usando la aplicación de la lógica difusa. Un control de trafico remedia el sistema usando reglas difusas para el control que mantiene el trafico arterial en una ciudad. Una velocidad de 10 millas por hora podría ser asignada para la categoría moderada hasta la pesada. El



valor actual para el tiempo de luz verde es derivado de la combinación de algunas reglas de ejecución:

Problema: Si el trafico de la arteria principal es bloqueado entonces la secuencia de las luces del trafico es probablemente inadecuada.

Solución: Si el trafico es bloqueado entonces incrementa el tiempo de luz verde en la arteria principal.

Reglas difusas:

Si el flujo del trafico es pesado entonces el tiempo de luz verde es largo.

Si el flujo de trafico es moderado entonces el tiempo de luz verde es amplio

Si el flujo de trafico es normal entonces el tiempo de luz verde es normal.

es Si el flujo de trafico es rápido entonces el tiempo de luz verde reducido.

Si el flujo de trafico es máximo entonces el tiempo de luz verde es restringido.

El proceso de conversión de los valores de entrada de proceso para la función de membresía difusa es llamada fuzificación. Los controles lógicos difusos combinan el concepto de funciones de membresía con las reglas de inferencia. Las reglas son usadas para determinar una salida del controlador basada sobre las funciones de membresía de entrada.

En este respecto los controles de lógica difusa asemeja el conocimiento basado en un sistema experto. La diferencia clave es que en un sistema experto, las condiciones de entrada son evaluadas como falsa o verdadera. Estas pueden ser unas reglas para cada combinación de las funciones de membresía de entrada. Cada establecimiento de condiciones de entrada pueden generar una única salida basada en las reglas. Con la lógica difusa desde las funciones de membresía cubren parcialmente pero en la mayoría de los casos mas de lo que puede aplicar una regla.



Una combinación de múltiples salidas difusas dentro de un valor de salida del controlador simple es llamado desfuzificación. La magnitud de cada salida difusa está basada sobre los valores de la función de membresía de las entradas. La combinación de salidas es el promedio de todos los pesos o cargas de las salidas por ese grado de membresía.

Las redes neurales y la lógica difusa son dos aproximaciones de control moderno que pueden ser combinadas en un número de caminos útiles si mutuamente son compatibles con las herramientas existentes. Complementando el aprendizaje para la implementación de referencia como una red neural difusa o un control difuso neural.

El punto esencia de la existencia de este término es que la red neural difusa opera sobre una membresía establecida difusamente de las variables del proceso, en lugar de los mismos valores de las variables del proceso. Un control difuso-neural requiere de un incremento de números de salidas comparado para la estrategia de control típico pero los avances significativos pueden ser obtenidos como un resultado.

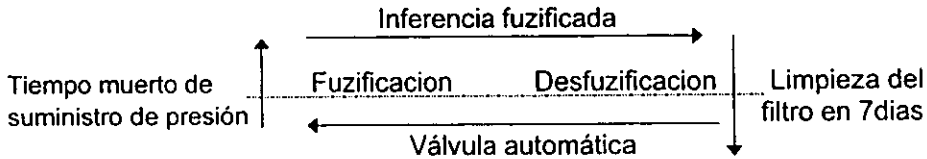
El gran beneficio puede resultar desde el diagnóstico. Específicamente se puede convertir los datos dentro de las recomendaciones útiles directamente del aprendizaje para mejorar el desarrollo de la válvula, reduce la variabilidad del proceso y el mantenimiento predictivo.

Naturalmente, un experto da ambos valores y las aplicaciones pueden repasar los datos y hacer recomendaciones. Sin embargo, si el experto por así decirlo después de escribir las reglas usa la interpretación de datos, cuando estos pueden ser usados por un sistema de lógica difusa puede llevarlo al mismo resultado.

Estos valores lingüísticos son interpretados dentro de un bloque inferencial difuso que está basado sobre el establecimiento de reglas y resultados. Por ejemplo, si la velocidad de cambio del ciclo de tiempo es incrementado y el suministro de presión es rápidamente decrementado esto puede resultar en una recomendación como "clarear el aire filtrado pronto". Las variables lingüísticas "rápidas" son desfuzificadas para una variable real "clarificación del filtro en 7 días". Este método también ofrece una flexibilidad excelente en esto, las reglas de inferencia son separadas de las



reglas de conversión de las variables. Esto permite la costumbre de los sistemas para un amplio rango de aplicaciones y cambios o arreglos como resultado de las experiencias.



Algunos bloques de inferencia difusa son usados y después estos son un numero de variables. Estas variables son agrupadas dentro de algunas combinaciones además que la misma variable puede ser asociada o usada por mas de un bloque de reglas.

Como la válvula automática y la aplicación de las especificaciones son para el aumento del conocimiento, el sistema debe adaptarse al nuevo conocimiento. Ese soporte flexible del sistema cambia, el cambio de las reglas de inferencia puede hacerse directamente, sin embargo, esto puede ser mas efectivo para mejorar solamente los cambios. Las redes neurales son usadas para afinar o ajustar el sistema por modificación del grado de soporte dentro de la regla de interpretación. Estas reglas y pesos pueden ser producidas sobre la solicitud de asegurar la lógica en los sistemas restantes.

En este caso en la conversión de variables real/lingüística la palabra "pronto" es la limpieza del filtro rápido que puede medir en 1 día o 1 mes dependiendo de la practica en la instalación específica.

Además, este soporte acostumbrado de el sistema de diagnostico para la instalación. Claramente estos pueden ser una evolución hacia el intercambio de inteligencia de control y válvulas automáticas fuera/dentro cuando la meta es la reducción de costos. El hardware y software debe expandir la sofisticación y reducir el costo en orden para justificar esa investigación inicial.



## APLICACIONES:

Un desarrollo importante en control difuso fue publicado en una publicación semanal por E.H. Mamdani y S. Assilian, "un experimento dentro de la síntesis lingüística con un controlador lógico difuso" en 1975, donde la posibilidad del control difuso fue establecido por la aplicación para controlar una maquina de vapor. La publicación de este artículo hace que exista un crecimiento en las corrientes de aplicación de la lógica difusa en una gran variedad de campos.

Promocionando en este campo fue el desarrollo de F. L. Smidth Co. inCopenhagen, Denmark de un control de lógica difusa para hornos de cemento y el uso sucesivamente mayor de control de lógica difusa por Hitachi y Kawasaki Heavy Industries en el sistema de tren subterráneo en Sendai, Japon.

Bajo el escepticismo, en una escasez de conocimiento de como es la lógica difusa y cuales son las ventajas que ofrecen. Para un grado menor, la misma aplicación para el uso de neurocomputadoras y de metodología de computación genética para control, metodologias donde, junto con la lógica difusa, constituyen el corazón de lo que es llamado "soft de computación".

Los usos, especialmente en los U.S., continúan por ser fuertemente en las aplicaciones de la lógica difusa. Fijada, la retroalimentacion desde el campo es importante el progreso. Entre algunas de estas aplicaciones se encuentra:

\* Atlan-Tec (Viersen, Germany) una firma de ingenieros independiente, aplica el control difuso en varios procesos industriales. Una aplicación concerniente a una planta petroquímica donde el software de información difuso es usada para el control supervisorio de una columna de destilación benceno-etileno. Las impurezas del C<sub>5</sub>-benceno o dietileno son extraídas desde el fin del producto en la columna de destilación.

Antes del control de lógica difusa la calidad del producto fue baja. Un promedio de 27 % de la salida tiene que ser procesado en la columna. Cuando esta operación era manual (reglas de manejo aplicadas por el





operador), el método de control supervisorio fue sustituido por algunas variables involucradas. Con la lógica difusa, el reciclado de los desechos es menor que un 5 % en promedio. El director afirma que el mejoramiento del control de calidad con la lógica difusa fue el de obtener \$ 1.1 millones que son anualmente salvados.

\* El control de temperatura es un sector usado frecuentemente. En algunas compañías, incluso Allen Bradley, se han desarrollado control de temperatura de lógica difusa llamado software Flex A-B. El procedimiento típico es precalentar la corteza o cubierta vinílica para formar un vacío y el control de temperatura del molde de inyección de la maquina es obtenido. En algunos casos, la lógica difusa mejora la velocidad del proceso por un 20 % comparado con el control convencional. La lógica difusa puede ayudar a reducir el numero de partes rechazadas.

\* Un proyecto de ABB (Heidelberg, Germany) incluye el uso de lógica difusa en la incineración de desechos. Lo critico del control es el espesor de la cama, como el desecho es empujado dentro de la reja para secado y triturado. Un sistema prototipo utiliza una combinación de lógica difusa y control PI que reserva las bases de puntos setpoint difusos sobre algunas variables de entrada. Un segundo bloque difuso adapta los parámetros del control a diferentes puntos de operación. Los beneficios basados en soluciones de lógica difusa son: perdida de la variación del espesor de la cama de desechos, tiempo de retención corto y un control de estructura mas estable.

\* ARCO Chemical Co. usa un circuito de control simple-logica difusa para la producción de oxido de propileno y estireno a lo largo de dos años. El controlador tiene una superfuncion que usa la lógica difusa para pasar supresión. Esa función proporcio muchos valores en procesos de polimerizacion tipo bach donde la temperatura no rebasa las calidades del producto, pero puede iniciar una reacción exotérmica peligrosa.

\* Una aplicación notable para la lógica adaptativa en el controlador lógico difuso es el control automático de la bolsa de aire. La lógica difusa recibe los requerimientos estrictos para reducir falsos disparos. Si además proporciona una respuesta rápida y es a bajo costo, comparada con los microcontroladores es una mejor opción.



La lógica difusa se utiliza en un rango para automatizar (transmitir, velocidad, sistema de paro de control) y el control de movimiento para la estructuración de polimeros y la protección del sistema de poder eléctrico. El ajuste de controladores difusos (con ajuste adaptativo y en si mismo) y la imagen del proceso son además dibujadas con mayor énfasis. La lógica difusa extiende los productos de campos industriales de control.

Los japoneses llevan el predominio de la lógica difusa pero las compañías americanas y europeas están también activas. En el área de control de procesos, los japoneses ganan en el aprendizaje. Las aplicaciones citadas por Motorola SSTE incluye la ondulación y laminado de aluminio (Fukukawa Aluminio); procesamiento químico (Mitsubishi Chemical); control de horno de vidrio (Daidan); control de molino de acero (Kawasaki Steel y New Nippon Steel); valoración de color de la impresora (Dainippon Paint Co.); espesura del acaramelado (Canon).

También en el ámbito ambiental, el control de la lógica difusa existe como una aplicación de la concentración de  $\text{No}_x$  reduciéndolo en la concentración de la planta de generación de poder apartir de carbón o hulla de calentamiento. Un proyecto semejante es el que existe para Chugoko Electric Power y Bailey Japan a una planta de 1000 Mw (una de las unidades mas extensas de hulla en el Japón). El control de  $\text{No}_x$  convencional fue drásticamente mejorado por el control de lógica difusa. El control de  $\text{No}_x$  introduce dificultades semejantes al tiempo muerto en las mediciones, fluctuaciones externas en los valores y complejidad en los análisis cuantitativos todos los cuales apropiados dentro de la esfera del control de la lógica difusa ensamblándose en la planta dentro de un sistema de control distribuido.

Las fabricas químicas de tratamiento de agua es altamente no-lineal, y el proceso es multivariable. Allen Bradley programa un ambiente difuso que existe en un modelo de automatización de una estación de tratamiento de agua para una gran fabrica química europea. La lógica difusa es parte del control de procesos en línea. Atendiendo el uso de la programación clásica se puede fundamentar que uno u otro es también complejo para la síntesis de control o estos son además lineales como para ser valido solamente en un rango estrecho de condiciones.



Inform GmbH (Aachen, Germany) y la Foxboro Co. (Foxboro, Mass) usa el control de la lógica difusa en una planta farmacéutica para optimizar el decantador. Como resultado se obtuvo el valor de salvamento \$ 70 000 en el costo de energía. En Humburg, Germany en una planta de incineración de agua emplean el control de lógica difusa para optimizar la ventilación del horno. La uniformidad de la zona de combustión reduce el dióxido y las emisiones de furan.

Thermo King Corp. (Mineapolis, Minn) usa lógica difusa para el control de temperatura fina de espacio de carga en el transporte de refrigerado (trailers) y equipo de aire acondicionado. Thermo King tuvo un notable mejoramiento por el control de la lógica difusa sobre el tradicional PID. Sin embargo, en casos mas complejos requiere del balance de variables mas complejas, uso de funciones de membresia y reglas que ayudan a especificar la necesidad de la acción de control. La simulación y compilación de herramientas proporcionadas por compañías semejantes a Inform Software Corp. (Chandler, Ariz.) permite la evaluación completa de las hipótesis del producto en tiempo real.

Los extensos usos comerciales de la lógica difusa son los controladores para labores semejantes al mantenimiento de energía térmica o temperatura, eficiencia en la energía de un aparato que enfría y calienta y la regulación de la sincronización y flujo de combustible en maquinas de automóviles.

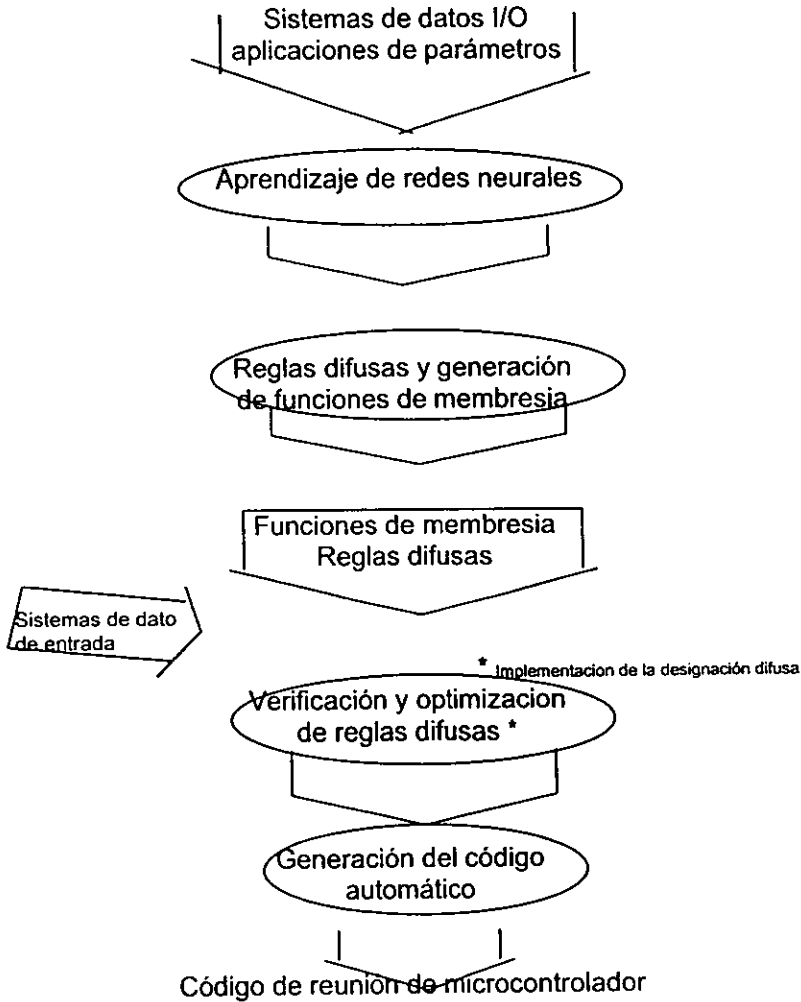
Los controladores también son usados para hacer una operación constante ajustándose para trenes subterráneos, aplicaciones de instrumentos de casa, cámaras fotográficas y elevadores.

En los siguientes años, la lógica difusa ha permitido el dominio entero como un chip de computadora, computadora gráfica, desarrollo de software, planeación financiera, procesamiento de información, análisis de venta, reconocimiento de idioma o habla, visión de la maquina, reconocimiento de carácter o personalidad. Se puede mejorar la rapidez, manejo, extensión y eficiencia.



Una organización de consultoría de redes neurales- difusas en donde la lógica difusa es usada para reducir dramáticamente el tiempo de desarrollo para un rango de aplicación de control incrustado desde la idea de un establecimiento de prototipo.

Sistema de combinación de la red neural/logica difusa





Generalmente la lógica difusa es mas frecuentemente usada para controlar; sin embargo, la tecnología es vía dentro de otras aplicaciones:

*Computadoras:* incrustación de computadoras, chips, sensores, señales de procesamiento, datos/información de procesamiento, desarrollo de software, y reconocimiento de discurso o habla.

*Transporte:* componentes automovilísticos (por ejemplo, sistemas de braking y transmisión).

*Militar:* aeroespacio o espacio aéreo.

*Industrial:* robótica, reconocimiento de patrones y visión de la maquinaria.

*Consumo electrónico:* T.V., cámaras fotográficas, y cámara de vídeo.

*Microelectrónica:* maquinas de plasma ácido y fabricación.

*Mercadeo o negocios:* decisiones de mercado, sistemas de calentamiento y enfriamiento, evaluación de riesgo, maquinas de copiado y modulación de empresas.

*Aplicaciones en casa:* maquinas de lavado, aire acondicionado, y el sistema de calefacción.

*Financiero:* análisis, pronostico, toma de decisiones, evaluación de riesgos.

*Económico y sociológico:* sistemas no lineales.

*Medicina y ciencia de la salud:* herramienta de diagnostico.

*Ventas:* análisis y herramientas de pronósticos

Como ya se menciona en párrafos anteriores, el reconocimiento de los japoneses del potencial de la lógica difusa es mas completo que la gente de otras partes del mundo. Una de las razones de esta confianza en las aplicaciones de la lógica difusa en Japón es el éxito del sistema ferroviario automático del Sendai, Japón.



Desde la apertura en 1987, el metro de Sendai usa un sistema de control difuso Hitachi. Un estudio elaborado por Hitachi mostró que un sistema de control difuso fue superior a uno convencional en su número de caminos incrementando el acercamiento dentro del acabado de una plataforma, incrementa el confort en el viaje por disminuir las aceleraciones y brincos o sacudidas, utilizando un poder eléctrico menor. El desarrollo de el sistema Sendai fue además impresionante estando listo dentro de un periodo de 12 meses, sobre éste 50 compañías japonesas se pusieron a trabajar para desarrollar la tecnología de la lógica difusa.

Como consecuencia de esto se tiene la existencia de la aplicación de tecnología difusa por compañías japonesas en un gran rango de productos incluyendo computadoras, cámaras fotográficas, automóviles y aplicaciones en el hogar.

En 1991, Japón capta cerca de 80 % de algunos billones de dólares por año en el mercado mundial por la lógica difusa de acuerdo con el mercado de desarrollo inteligente.

Los japoneses están situando las miradas sobre las aplicaciones de la lógica difusa para producir futuras generaciones de computadoras personales de alto desarrollo y estaciones de trabajo que están siendo creadas por una demanda de rapidez en el tiempo de búsqueda dentro de los aparatos. El tiempo de búsqueda esta limitado por el desarrollo del movimiento del actuador de la cabeza, tanto fuente como método de control.

Un algoritmo de control tuvo una aplicación para un controlador con un manejo difícil de 3 1/2 in, mejorando el tiempo de búsqueda de aproximaciones de 20-30 % sobre el control convencional. El algoritmo fue elaborado por el laboratorio de desarrollo de equipo de información de Matsushita Electric Industrial.

Algún día se podrá regular con la lógica difusa el voltaje del ajuste del switch de poder suministrado a una nueva computadora personal o estación de trabajo. Un equipo de la Universidad de Kumamoto y del Gobierno tecnológico de Kumamoto desarrollaron un nuevo sistema de control usando lógica difusa. El grupo mejora ese control difuso experimental dentro del software de una computadora personal.

OkI Electric Industry (Tokyo) recientemente introduce una nueva inferencia difusa lo que se espera tendrá un mejoramiento del desarrollo de controladores difusos para un orden de magnitud y reduce substancialmente



el costo del controlador. Otra compañía japonesa, Omron (Kyoto) maneja mas de 200 patentes para productos difusos y ofrece alrededor de un controlador difuso IC chips que representan la designación de la segunda generación.

El Laboratorio para International Fuzzy Engineering Research tiene un proyecto de seis años que esta desarrollando futuras aplicaciones de lógica difusa dentro del soporte de decisiones, robotica y computación difusa. (incluyendo la memoria asociada difusa). Con el acopio independiente del sistema lógico difuso del Instituto japonés en Lizuka, donde una neurona difusa fue usada para un sistema experimental de manejo-escritura-reconocimiento.

Una neurona difusa es análoga a una neurona en una computación neuronal excepto que estas toman establecimiento difuso como entradas y salidas en un establecimiento difuso como una salida. Un numero de gentes en el Japón desarrollan conjuntamente experimentos de tecnologías difusas-neurales para complementar uno con otro y envolver así una tecnología "neuro-difusa".

Un equipo de el Instituto de Tecnologia de Hiroshima ha demostrado un dispositivo de inferencia difusa óptica. En este caso, la luz pasa a través de platos traslúcidos en donde están inscritas las funciones de membresia que representan el establecimiento difuso en una premisa de reglas, y la cantidad de luz emitida es medida para llegar a una conclusión de las reglas. La computación óptica difusa puede proporcionar el reconocimiento en tiempo real del movimiento de las imágenes.

Laboratory for International Fuzzy Engineering Research ha desarrollado un circuito de lanzamiento aleatorio difuso. La arquitectura de una estación de trabajo basada en la lógica difusa en donde la maquina ha experimentado con difuso (multinivel) y clásico (binario) en procesamiento dentro de la arquitectura. Se puede usar la maquina para abordar problemas como es el lenguaje natural y la descripción del conocimiento, aplicaciones que son difíciles de mejorar con las computadoras personales convencionales y una estación de trabajo.

CONCLUSIONES. La lógica difusa no es una panacea para la situación de todos los problemas, pero ese valor es considerado en algunos casos. El resultado final depende del conocimiento usado acerca del problema y aplicando el medio justo para resolverlo. El comportamiento con la linealidad es entre el poder de transparencia de la lógica difusa. Con los



grados de membresía, es mejor para aplicarse a un sistema de clasificación de algunos grados. En un sistema de automatización disponible comercialmente, los grados utilizados son muy pequeños, pequeños, medios, extensos y muy extensos. La lógica difusa de control de linealidad y no linealidad de procesos en el mismo excepto esa clasificación dentro de las situaciones de no-linealidad no es un arreglo directamente equitativo.

Debido a la distribución separada con toda la situación del proceso, el método es apropiado para aplicaciones que requieren situaciones específicas o control de zonas específicas. Por ejemplo, el control difuso esta proporcionando la solución del problema deseado del control de nivel de entrada de las bombas y el manejo de tanques de evaporación de la planta. El problema de control que involucra áreas de salida; baja, media y alta puede ser resuelto por diferentes caminos e independientemente uno de otro. Por la aplicación de la lógica difusa dentro de un base de consistencia media o reserva del medio de bombeo una fabrica experimentando un 50 % de mejora comparada con control PID normal.

En algunos procesos, la mayoría de las mediciones importantes son frecuentemente imprecisas o irreales. la lógica difusa puede ser usada para mejorar los datos de mediciones por el suministro de datos suplementarios. La lógica difusa puede ser usada para el control de énfasis de lugar sobre la disponibilidad de mediciones o puede ser utilizada para producir nuevos valores enteramente.

En general, la lógica difusa es frecuentemente implementada dentro de una visión experimental pero actualmente la simulación de la operación de los procesos mejora resultados. En las estrategias de lógica difusa tienden a reforzar para habilitar la distribución con las situaciones una a una. Si se encuentra una operación que llega a un buen resultado para permanecer dentro de un valor seleccionado para una situación específica, esta información puede ser presentada como una deducción de una cadena para el control lógico. Por una entrevista al operador de proceso la información puede ser obtenida para mas cadenas independientes, que puede ser automatizada una como un tiempo por medio de la lógica difusa. Sin embargo, el concepto de tener un control difuso como una herramienta es una aproximación muy practica en la eficiente implementacion de las estrategias de control.

La teoría de control clásica es la concerniente con el principio donde el control es originado por el setpoint. Pero gana rápidamente una importancia en la labor de orientación o control supervisorio, ejemplificado





por el control de tráfico, control de la planta, operaciones de ensamblado, control de calidad, mantenimiento de emergencia y robótica. La limitación del control clásico surge cuando problemas de este tipo son encontrados. En contraste, en la realidad del control orientado a esa labor, el control difuso tiene mucho que ofrecer.

Para enfatizar, sin embargo, es que en las aplicaciones clásicas de control difuso son sinérgicas y complementarias mejor que la competitiva. unos de estos puntos son entendidos al razonar el argumento donde el control clásico es mejor que el control difuso y viceversa.

En la lógica clásica se tienen los requerimientos de membresía rígida donde cada objeto está completamente incluido o excluido desde un establecimiento. En contraste a ese escenario de falso o verdadero, el establecimiento difuso sigue la continuidad del establecimiento de membresía en un rango de 0 a 1. En las proximidades de los 60's, Zadeh mejora el desarrollo original; por Bark Kosko profesor de ingeniería eléctrica para la Universidad de Southern California en 1991 en su libro de Neural Networks y sistemas difusos llama un sistema dinámico de aproximaciones para máquinas inteligentes, este tipo de multivariables lógicas fue primero explorada por Jan Lukasiewicz un perfeccionista de la inversión de la notación perfeccionista. Max Black un filósofo cuántico se apoya en el trabajo de Jan Lukasiewicz y crea el inicio de como la gente piensa con una función de membresía de establecimiento difuso. Zadeh subsecuentemente desarrolla el conocimiento de la gente como técnica de establecimiento difuso introduciendo el término difuso dentro del lenguaje distribuido con que Black se refería a la vaguedad. En 1965, Zadeh publica el artículo del seminario con el objeto de establecimiento difuso.

Se dice que el establecimiento difuso es fácil de designar, contruir, validar y retroceso para algunas razones, semejante a tolerancia de falla y capacidad para el paralelismo esos son extremadamente robustos. Pero algunas gentes están perdiendo la confianza al uso de sistemas de lógica difusa debido a que la creación, verificación, refinación son muy difíciles o que el sistema es inestable.

Un problema ligado dentro del áreas de la refinación de las funciones de membresía, es que no existe el procedimiento para determinar cuando una función de membresía es observada por ajuste. Un punto a debatir es cuando los modelos difusos proporcionan resultados ambiguos o acercamientos. El uso de la lógica difusa ofrece la misma clase para determinar resultados que se pueden esperar desde algún otro sistema convencional. La lógica booleana es para la lógica difusa como un switch



de luces para una amortiguación. Los problemas en el mundo real son imprecisos, la lógica difusa mejora dramáticamente la capacidad de modelado del conocimiento de la gente en áreas vagas semejante a la economía o desarrollo de la ciencia.

Hay muchas oportunidades para mejorar la operación de una instalación mediante la utilización de técnicas de control avanzado. Conceptualmente, todo proceso de mejora comparte un análisis de decisiones complejas relacionado con problemas de asignación, que conlleva la selección de los valores mas adecuados para determinar variables interrelacionadas, centrando la atención en un objetivo único diseñado para cuantificar el rendimiento y medir la calidad de la decisión.

Cuando uno se encuentra frente a un problema de decisión complejo, no van a ser frecuentes las ocasiones en las que será posible representar toda la complejidad de las interacciones entre las variables, sus restricciones y objetivos más adecuados, por lo que solo por medio de la práctica y la experiencia aprendemos a identificar y evaluar los aspectos importantes de un problema concreto.

Con independencia de los logros finales, el solo hecho de acometer la tarea de implantación de la lógica de intensidad dentro de un sistema de control es, por sí misma, un ejercicio inestimable, ya que la fase de formulación pormenorizada del proceso implica un análisis exhaustivo del mismo y del modo en que opera, y obliga a los ingenieros y operarios a un esfuerzo para definir claramente cuáles son los resultados importantes y cuales los ajustes posibles.

## **CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES.**

El rango distintivo de la tecnología moderna de control avanzado es la utilización de computadoras de alta capacidad y de modelos matemáticos que representan en forma dinámica un proceso determinado. La inclusión de ecuaciones matemáticas permite establecer una relación multifuncional entre todas las variables en el sistema, esto es, mediante ellas es posible predecir cual es la influencia de variables manipulables y perturbaciones sobre las variables que se desean controlar con determinada finalidad técnica y económica.

Las metas fundamentales de la manufactura son simples. Hacer un producto de la más alta calidad posible con el más bajo costo posible. De las dos metas, la calidad es la más importante en el clima competitivo del mercado actual. Un camino clave es que los sistemas de control avanzado pueden reforzar la calidad, vía herramientas de inteligencia artificial (particularmente los sistemas expertos, redes neurales y lógica difusa). La segunda meta, reducción de costos de la manufactura, también presenta muchas oportunidades para la tecnología de control avanzado, triunfando básicamente por incrementar la productividad con sus bajos costos.

Todas las tecnologías descritas tienen la capacidad, si son aplicadas apropiadamente para mejorar una operación de manufactura. El cambio real para el proceso o ingenieros de mantenimiento es el de seleccionar una aplicación que permita resultados en cortos términos de implementación. Si los recursos están disponibles para ser explotados, esas tecnologías y su potencial de aplicación se procuran en una escala amplia. Combinando una aplicación para mantenimiento y otra para soporte del operador en un proceso crítico, puede permitir al ingeniero ganar experiencia en desarrollo de sistemas expertos dando proyectos que son de un límite suficientemente extenso para expectativas de los sucesos que son buenos.



El potencial de la tecnología de la lógica difusa muestra la justificación de los recursos para las investigaciones de las aplicaciones posibles. En un proceso que es difícil de controlar en donde después de todo, si el proceso no es controlado con métodos de control convencional es poco arriesgada la implementación de la lógica difusa. El ingeniero de control responsable del proceso puede cambiar el circuito de control y seleccionar el hardware de un vendedor respetable de productos de la lógica difusa.

La tecnología de redes neurales requiere de un entrenamiento especial; así pues, si no puede ser informado del acometer inicial o ataque inicial a un problema específico del control. En su lugar puede ser seleccionado uno o dos ingenieros para entrenarse apropiadamente en aplicaciones de redes neurales de aplicación en procesos de control. El curso de entrenamiento tiene una regulación básica por el desarrollo de productos de redes neurales. La ganancia o beneficio del conocimiento necesario, y con sucesivas implementaciones de la I. A., es un proyecto de redes neurales que puede ser aceptado rápidamente.

Una de las potencias de la I. A. es su flexibilidad para ser adaptadas a aplicaciones específicas. Se considera la integración de los sistemas expertos y las redes neurales para explotar los avances de cada uno: los sistemas expertos colectan los datos necesarios, la red analiza esos datos, después el sistema experto consigue una conclusión a partir del análisis.

Un proceso complejo combinado con la lógica difusa y la capacidad del sistema experto para la formación de los posibles diagnósticos. La lógica representa un camino en el softening tradicional si/no de una visión de la lógica en un análisis de situaciones de alarma y situaciones anormales donde los patrones pueden ser configurados directamente por el uso o acumulación automática desde un sistema experto.

Las redes neurales y la lógica difusa son dos aproximaciones de control moderno que pueden ser combinadas en un número de caminos útiles si mutuamente son compatibles con las herramientas existentes. Combinando el aprendizaje para la implementación de referencia como una red neural difusa o un control difuso neural. El punto esencial de la existencia de este término es que la red neural difusa opera sobre una membresía establecida difusamente en las variables de proceso, en lugar de los mismos valores de las variables de proceso.



Los **sistemas expertos** además presentan las siguientes ventajas respecto a los expertos humanos:

1. Están siempre disponibles a cualquier hora del día y de la noche, y de forma ininterrumpida.
2. Puede duplicarse (lo que permite tener tantos como se necesitan).
3. Pueden situarse en un lugar donde sea necesarios aun en lugares hostiles, peligrosos, etc.
4. Permite tener decisiones homogéneas efectuadas según las directrices que se fijen.
5. Son fáciles de reprogramar (mentalidad abierta).
6. Explican los procesos (por lo que a sus usuarios les enseñan a ser expertos en la materia).
7. Pueden perdurar y crecer en el tiempo de forma indefinida, posible extensión.
8. Pueden ser consultados por personas u otros sistemas informativos.
9. Transferencia del conocimiento que ocurre gradualmente a través de muchas interacciones (la cantidad del conocimiento depende de la labor).
10. Capacidad continua de almacenamiento, revisión de conocimiento y adquisición del conocimiento nuevo.

Las siguientes desventajas que se presentan son las siguientes:

1. Los expertos humanos son irremplazables puesto que hoy por hoy los conocimientos que poseen los sistemas expertos proceden de ellos y se comportan de una forma torpe y limitada, no viéndose todavía cercano el momento en que puedan aprender por si solos, y llegado el caso, siempre resulta más barato y eficaz, aprender con un maestro que redescubrir la rueda.
2. La problemática de los sistemas expertos industriales se centra en la necesidad de que los sistemas expertos se comuniquen con dispositivos sensores, base de datos, dispositivos de mando, accionadores, etc. y todo ello en tiempo real.
3. La mayoría de los sistemas basados en reglas de producción no se basan en una semántica bien definida. Esto da lugar a un comportamiento injustificable, y en algunos casos impredecible.
4. La lógica no es lo bastante expresiva, es decir, hay un límite demasiado grande con respecto a lo que se podía representar debido a que no puede tratar conocimientos incompletos, inciertos o imprecisos.
5. Los algoritmos para manipular conocimientos obtenidos de la lógica, son ineficaces.



6. Costoso, si no imposible, aprovisionamiento de programas para acción, explicación conceptual de soluciones que, por instantes en un sistema de diagnostico, no solamente incluye cuando a edición del diagnostico fue elaborado solo por ser de ese modo establecido.

Las **redes neurales** tienen entre sus propiedades:

1. Sistemas de alta interconexión en procedimientos (la capacidad de procesamiento es almacenada en conexiones cargadas que son obtenidas por un proceso de adaptación o aprendizaje).
2. Manejo de datos (observa datos usados por sistemas edificados o construidos).
3. Aprendizaje por ejemplos.
4. Sucesión o entrenamiento (no programado) para una aplicación.
5. Habilidad para usarse en una vasta cantidad de sensores de información.
6. Los modelos basados en redes neurales exhiben un alto grado de robustez y tolerancia a las fallas debido a las representaciones distribuidas.
7. Tienen una capacidad de mapeo general, puesto que la teoría de detección de fallas tradicional involucra modelado detallado del sistema.
8. El conocimiento de una red neural artificial es especificada extensamente a través del aprendizaje, puesto que casi todas las técnicas confían en un algoritmo preespecificado.
9. La principal ventaja sobre otros métodos de modelado es que la estrategia de control para un proceso puede ser determinado directamente fuera de los detalles acerca del proceso y fuera de una idea formal acerca de la función objetivo cuantitativa para la operación de la planta que puede ser usado fácil y eficientemente para entrenar las redes.

Entre las debilidades:

1. Aplicado únicamente en sistemas donde se disponga de una gran cantidad de datos experimentales. Si son pocos los datos de entrada-salida sobre un problema, se debe reconsiderar el uso de la red neural.
2. No se tiene una base fundamental para el modelado y puede ser peligroso extrapolar desde ahí.
3. Para situaciones muy complejas, el esfuerzo y el tiempo de computadora involucrados puede ser muy largo. Es decir, el entrenamiento puede tener una extensión que hará impracticable la red.
4. No garantiza el acercamiento al 100%; dentro de las aplicaciones de diagnóstico de falla, en algunas la red neural puede diagnosticar mal o erróneamente solamente en un 1 % del tiempo y en otras puede ser del



33%. En algunas aplicaciones como las militares se requiere cerca del 100% de confianza y se debe tener precaución cuando se usa una red neural.

- Una limitación de la computación neuronal es que las redes son entrenadas y no programadas, requieren de una cantidad suficiente de datos de la selección de propiedades que deben estar disponibles para llevar a la red a un modelo aproximado de un proceso complejo. También el entrenamiento del proceso debe ser periódicamente adecuado para mantener el acercamiento de la red, si esto es combinado con un proceso dinámico en tiempo real, la red se acorta y el acercamiento de esas predicciones es mayor.

<i>Uso inapropiado de la RN:</i>	<i>Uso apropiado de la RN:</i>
Cálculos numéricos; cuando se requiere de alta precisión.	Arreglo, distribución o diseño de reconocimiento.
Modelado; si anteriormente ya se tenía un buen modelo físico.	Decisión; cuando las reglas de un problema son desconocidas o son complejas
Optimización; cuando se requiere de un óptimo global.	Pronóstico.
Cuando existe una solución simple.	Modelado; procesos que no se conocen o sobrentendido.
	Optimización; cuando una solución sub-óptima es aceptada.

De la **lógica difusa** se tiene como propiedades.

- Técnicas matemáticas para cuantificación cualitativa de variables y funciones.
- Manejo lingüístico (esto es computación con palabras).
- Conocimiento expresado en una fuente o camino más natural, por uso de variables lingüísticas que son descritas por armaduras difusas.
- Si una persona puede describir el proceso, se puede ofrecer por implementación con un sistema experto.
- Es una herramienta capaz de realizar el control supervisorio automático debido a que permite la estrategia de operación humana para ser transformada directamente en una solución. La realidad es que la lógica difusa produce un resultado repetido exacto para cada combinación posible de las condiciones de entrada.



<i>Uso inapropiado de la lógica difusa:</i>	<i>Uso apropiado de la lógica difusa:</i>
Modelado; se resuelve fácilmente y adecuadamente alrededor de un modelo matemático existente.	Modelado; procesos muy complejos o no lineales donde no existe modelo matemático simple.
Control; el proceso es lineal (cuando se usa control PID) y la teoría de control convencional produce un resultado satisfactorio.	Control; procesos altamente no-lineales.
Decisión; cuando los procesos no pueden ser descritos en palabras.	Decisión; cuando los procesos lingüísticos formulados son por conocimiento experto.

Hay que tener en mente que este trabajo fue enfocado hacia el mejoramiento de calidad y productividad de la planta productiva, pero muchas otras aplicaciones potenciales sobre otras áreas tienen un valor tangible. Por ejemplo, los sistemas expertos pueden ser usados en apoyo y especificación del staff, designación de la ingeniería, proyectos de mantenimiento; las redes neurales pueden ser implementadas para los pronósticos de producción. Si es claro que la I. A. es el hábitat y nosotros jugamos en tomar la visión que logre avances de sí, antes de aplicarse basándose en las experiencias propias y ajenas.

Debido a que se presentan innumerables trabajos de ingeniería de control fuera del país, es necesario evaluarlos continuamente y adaptarlos para suplir en parte nuestras deficiencias tecnológicas, hasta que llegado el momento, podamos llegar a desarrollar una tecnología propia para beneficio directo de nuestra industria.





## **BIBLIOGRAFIA.**

- 1.- Agrawal S. S., **"Integrate blending control, optimization and planning"**, Hydrocarbon processing, vol. 74, no. 8, august 1995, pp. 129-132.
- 2.- Allen Don & Smith Dave, **"SCADA: setting the record straight"**, INTECH, vol. 41, no. 9, september 1994, pp. 23
- 3.- Amable González J., **"Sistemas de control distribuido, parte 1"**, Ingeniería Química, enero 1982, pp. 119-130.
- 4.- Amable González J., **"Sistemas de control distribuido, parte 2"**, Ingeniería Química, febrero 1982, pp. 137-144.
- 5.- Anderson J. S., **"From native wit to advanced process control"**, Measurement + Control, vol. 30, no. 3, march 1997, pp. 47-54.
- 6.- Ayrál T. E. & Conley R. C., **"Advanced control documentation for operators"**, Hydrocarbon processing, vol. 67, no. 9, september 1988, pp. 103-104.
- 7.- Ayrál T. E. & Conley R.C., **"Gaing operator acceptance of advanced controls"**, Hydrocarbon processing, vol. 66, no. 6, june 1987, pp. 42-43.
- 8.- Ayrál T. E. & Conley R. C., **"On-line expert system for process control"**, Hydrocarbon processing, vol. 68, no. 6, june 1989, pp. 61-63.
- 9.- Baratti R., **"Neural network modeling of distillation columns"**, Hydrocarbon processing, vol. 74, no. 6, june 1995, pp. 35-38.
- 10.- Barnett William, **"Training paves the way from analog to digital distributed control"**, Control, january 1997, pp. 58-60.
- 11.- Barragán Pita L., **"Aplicaciones posibles de la computadora digital electrónica en plantas de procesamiento industrial"**, Revista del Instituto Mexicano del Petróleo, Enero 1976, pp. 82-87.
- 12.- Barragán Pita L., **"Los sistemas de control automático de tipo industrial"**, Sección México A.C., 1981.



- 13.- Barreth R. & Panjoff J., **"Training DCS operators"**, Hydrocarbon processing, vol. 71, no. 3, march 1992, pp. 95-98.
- 14.- Barron Janet, **"Putting fuzzy logic into focus"**, Byte, vol. 18, no. 4, april 1993, pp. 111-118.
- 15.- Bartos Frank J., **"Fuzzy logic continues to grow, well-guarded by user's wraps"**, Control engineering, vol. 41, no. 5, may 1994, pp. 83-87.
- 16.- Bartos Frank J., **"Fuzzy logic reaches adulthood"**, Control engineering, vol. 43, no. 6, july 1996, pp. 50-56.
- 17.- Bartos Frank J., **"Fuzzy logic wides its appeal to industrial controls"**, Control engineering, vol. 40, no. 6, june 1993, pp. 64-67.
- 18.- Battelle ...putting technology to work, **"Cognitive control technologies in advanced controls and diagnostics"**, Automated controls and advances processes workshop, 1996.
- 19.- Beevers Andrew, **"Distributed control systems put through their paces"**, Processing, may 1987, pp. 33.
- 20.- Blickley George J., **"SCADA systems affected by distributed control"**, Control engineering, vol. 32, no. 3, march 1985, pp. 79-81.
- 21.- Boston Joseph F., Britt Herbert & Taygabkhan Michael, **"Software: tackling tougher tasks"**, Chemical engineering progress, vol. 89, no. 11, november 1993, pp 38-49.
- 22.- Boy Guy A., **" Intelligent assistant systems-knowledge based systems"**, Academic Press, Great Britain, 1991, vol. 6, pp. 124-210.
- 23.- Bristol E.H., **"After DDC: idiomatic control"**, AIChE, vol. 26, no. 11, november 1980, pp.84-89.
- 24.- Bristol E.H., **"Effective application of technical innovation"**, ISA TECH/ EXPOTECHNOLOGY UP DATE, Vol. 1, part. 2, Future technology for measurement and control, Anaheim convention, California, october 7-9, pp. 99-108.



- 25.- Buckley Page, **"Techniques of process control"**, 1ª reprint edition, Publishing Company Huntington, 1979, pp. 1-7.
- 26.- Buster Alan, **" Q and A on digital control systems"**, Hydrocarbon processing, vol. 62, no. 6, june 1983, pp. 69-73.
- 27.- Caputo Don, **"Digital vs. analog control for hydraulic and pneumatic systems"**, I&CS, february 1993, pp. 47-49.
- 28.- Champagne Raymond, **"Automated valve diagnostics with a sensor network"**, ISA TECH/ EXPOTECHNOLOGY UP DATE, Vol. 1, part. 5, Future technology for measurement and control, Anaheim convention, California, october 7-9 1997, pp. 515-520.
- 29.- Chesmond C. J., **"Control system technology"**, Edward Arnold, Australia, 1982.
- 30.- Cocheo Steve, **"Avoid vulnerable distributed control system architectures"**, Hydrocarbon processing, vol. 62, no. 6, june 1983, pp. 59-64.
- 31.- Colclazier Jay, **"Fuzzy logic on effective alternative to PID control"**, ISA, 1993,
- 32.- Coriat Benjamin, **"El taller y el robot"**, Ensayo sobre el fordismo y la producción en masa en la era de la electrónica, España, Siglo veintiuno editores, 1992, pp. 17,38,67.
- 33.- Cotter J.E., **"Justifying direct digital control"**, Chemical engineering progress, vol. 65, no. 5, may. 1969, pp. 52-56.
- 34.- Craig Smith, **"Better beer through process automation"**, Control, june 1995, pp. 46-51.
- 35.- Crowe Edward & Vassiliandis Costas, **" Artificial intelligence: starting to realize its practical promise"**, Chemical engineering process, january 1995, vol. 41, no. 1, pp. 22-31.
- 36.- DiBiano R., **"Advanced control: general purpose design vs. working it out in the field"**, Hydrocarbon processing, vol. 61, no. 8, august 1982, pp. 79-81.



- 37.- DiBiano R., **"Advantages of third generation computer control"**, Hydrocarbon processing, vol. 61, no. 6, June 1982, pp. 117-121.
- 38.- Dobriuje Popovic & Vijay Bhatkap, **"Methods and tools for applied artificial intelligence"**, 1ª edición, Marcel DeKler, New York, 1994.
- 39.- Dorf Richard, **"Sistemas automáticos de control, teoría y practica"** Fondo educativo interamericano, 1977, pp. 3-5.
- 40.- Dronoff A., **"Improve return on advanced controls"**, Hydrocarbon processing, vol. 70, no. 10, october 1991, pp. 112-113.
- 41.- Elley David, **"DCS on-line information improves resin process consistency"**, I&CS, nobember 1991, pp. 63-69.
- 42.- Farr Michael, **"Control systems for industrial design"**, Gower Press, 1966.
- 43.- Fost A. S., **"Critique of chemical process control theory"**, AIChE Journal, vol. 19, no. 2, march 1973, pp. 209-214.
- 44.- Fritz Jeffrey, **"Digital remote access"**, Byte, vol. 19, no. 9, sept. 1994, pp. 125-132.
- 45.- Frost Richard, **"Base de datos y sistemas expertos, Ingenieria del conocimiento"**, Ediciones Díaz de Santos, Madrid, 1989.
- 46.- Giacone G. & Tuben S., **"Manage fuel gas with a experts system"**, Hydrocarbon processing, vol. 75, no. 9, september 1996, pp. 69-72.
- 47.- Gibsen E. John, **"Control systems components"**, McGraw Hill, 1968, pp. 17-48.
- 48.- Giral José, **"Ingeniería de procesos"**, 2ª edición, México, Alhambra, 1979, pp. 126.
- 49.- Goble W. M., **"Using PLCs in safety applications"**, Hydrocarbon processing, vol. 75, no. 6, june 1996, pp. 47-50.



- 50.- Gokhale N.D. & Shokla N.V., "**Advanced control of nonlinear processes**", Hydrocarbon processing, vol. 70, no. 4, april 1991, pp. 75-78.
- 51.- Hernandez Pedro José, "**Redes neurales en la industria química**", Ingeniería química, agosto 1993, pp. 37-41.
- 52.- Hils Frank, "**Comunicación digital en la industria de proceso**", Ingeniería Química, Febrero 1997, pp. 59-64.
- 53.- Honeywell & Allen Bradley, "**Digital control repays investment**", Processing, February 1980, pp. 15.
- 54.- Huo Benjamin C., "**Sistemas automaticos de control**", Cía. Editorial continental, 2ª edición en español, 1991.
- 55.- Johnson Dick, "**SCADA software raises the states**", Control engineering, vol. 43, no. 10, october 1996, pp. 80-86.
- 56.- Kerridge A. E., "**Operators can use expert systems**", Hydrocarbon processing, vol. 66, no. 9, sep. 1987, pp. 97-105.
- 57.- Klages Scott A., "**Industrial implementation of remote accessed SCADA system using fully integrated graphical user interface, data acquisition system, and PLC control**", ISA TECH/ EXPOTECHNOLOGY UP DATE, Vol. 1, part. 5, Future technology for measurement and control, Anaheim convention, California, october 7-9 1997, pp. 501-506.
- 58.- Koulouris Alexandros & Bakshi Bhavik, "**Empirical learning through neural networks: the wave net solution**", Advances in chemical engineering, Academic press, vol. 22, pp. 437-467.
- 59.- Latour Pierre L., Sharpe J.H., & Delaney Michael, "**Estimate benefits from advanced control**", Instrumentation in the chemical and petroleum industries, vol. 18, proceedings of the Conference and exhibit for instrumentation and control systems, Cleveland, Ohio, may 19-22, 1986, Instrument Society of America.
- 60.- Lee A. Kane, "**The evolving DCS**", Hydrocarbon processing, vol. 75, no. 6, june 1996, pp. 13.



- 61.- Levine Gutierrez Guillermo, **"Introducción a la computación y a la programación estructurada"**, 2ª. edición, México, McGraw-Hill, 1990, pp. 19-25.
- 62.- Long Larry, **"Introducción a la informática y al procesamiento de información"**, México, Prentice-Hall Hispanoamericana, 1986, pp. 44-55.
- 63.- Luyben William L., **"Process modeling, simulation and control for chemical engineers"**, Second edition, McGraw-Hill, pp. 6-8.
- 64.- Maskins D. E., **"Group methods for advanced column control compared"**, Hydrocarbon processing, vol. 64, no. 5, may 1985, pp. 93-96.
- 65.- Mateus Francisco, **"Aplicacion de la logica difusa al control de procesos"**, Ingenieria Química, febrero 1993, pp. 135-139.
- 66.- Mavrovouniotis Michael L., **"Artificial intelligence in process engineering"**, Academic Press, San Diego California, 1990.
- 67.- Melli Roberto & Sciubba Enrico, **"Prototype expert system for the conceptual synthesis of thermal process"**, Energy conversion & management an International Journal, vol. 38, no. 15-17, october-november 1997, pp. 1737-1749.
- 68.- Morrison Steve & Joe Quin, **"Neural networks for process prediction"**, Conferencia ISA, 1993, pp. 443-450.
- 69.- Mukerji P. K. & McDermott, **"Application of expert system in offshore structure installation"**, Construction & Installation/Fiel drilling development systems, vol. 3, may 1993, Houston Astroslomc in complex, pp. 215-221.
- 70.- Nilsson J. Nils, **"Principios de inteligencia artificial"**, 1ª edición, España, Ediciones Díaz de Santos, 1987, pp. 2-4 y 13-14.
- 71.- Nistal B. Jose M., **"Control avanzado multivariable"**, Ingenieria Química, febrero 1991, pp. 129-136.
- 72.- Norris Mark & Righy Peter, **"Ingeniería de software explicada"**, 1ª edición, México, Noriega, 1994, pp. 29-30,33.



- 73.- Ogata Katsuhiko, **"Ingeniería de control moderna"**, Prentice-Hall Hispanoamericana, 1980, pp. 1-3.
- 74.- Oilila Antero, **"Operating experience with distributed digital control"**, Hydrocarbon processing, vol. 62, no. 10, october 1983, pp. 87-91.
- 75.- Olmstead Clay, **"Digital signal processing reduces data acquisition problems"**, I&CS, june 1983, pp. 53-57.
- 76.- Palm J. William, **"Control systems engineering"**, John Wiley & Sons, United States of America, 1986.
- 77.- Pelham R. & Parris C., **"Refinery operations and control: a future vision"**, Hydrocarbon processing, vol. 75, no. 7, july 1996, pp. 89-94.
- 78.- Pellón Díaz J., **"Transmisión digital en los gasoductos de transporte"**, Ingeniería Química, agosto 1991, pp. 109-112.
- 79.- PEMEX, **"Boletín monitec actualidades tecnológicas, gerencia de investigación y de desarrollo tecnológico"**, Subdirección de producción, refinación, vol. 4, no. 3, junio 1997, pp. 12-13.
- 80.- Phiroz Bhagat, **"An introduction to neural nets"**, Chemical engineering progress, vol. 87, no. 8, august 1990, pp. 55-60.
- 81.- Pike R. W., **"Selecting microcomputers for engineering"**, Hydrocarbon processing, vol. 63, no. 2, february 1984, pp. 51-56.
- 82.- Poche H., **"Fiber optics; characteristics and applications"**, Hydrocarbon processing, vol. 69, no. 5, may. 1990, pp. 85-86.
- 83.- Quattrille Thomas & Y. A. Liu, **"Introduction to artificial neural networks, artificial intelligence in Chemical engineering"**, Academic press, San Diego California, 1991, cap. 7, pp. 441-487.
- 84.- Ramasamy S: & Deshpande P., **"Consider neural networks for process identification"**, Hydrocarbon processing, vol. 74, no. 6, june 1995, pp. 59-62.
- 85.- Rhemann H & Schwarz G., **"On-line FCCU advanced control and optimization"**, Hydrocarbon processing, vol. 68, no. 6, june 1989, pp. 64-71.



- 86.- Richard L. & Watson D., "**Advanced control improves HMC- VGO unit operation**", Hydrocarbon processing, vol. 74, no. 3, march 1995, pp. 163-172.
- 87.- Russell Kelly, "**In control of your profit**", ISA TECH/ EXPOTECHNOLOGY UP DATE, Vol. 1, part. 5, Future technology for measurement and control, Anaheim convention, California, october 7-9 1997, pp. 77-86.
- 88.- Rys Richard, "**Advanced control methods**", Chemical engineering, vol. 91, no. 8, August 20 1984, pp. 151-158.
- 89.- Sanchez y Beltrán Juan Pablo, "**Sistemas expertos, una metodología de programación**", México, Coedición Macrobit & Rama, 1990, pp.5 y 214.
- 90.- Sanders Fred, "**Key factors for successfully implementing advanced control**", ISA TECH/ EXPOTECHNOLOGY UP DATE, Vol. 1, part. 5, Future technology for measurement and control, Anaheim convention, California, october 7-9 1997, pp. 335-341.
- 91.- Schagin E.F., "**Evolution of a distributed control system**", EEP, june 1980, pp. 72-75.
- 92.- Setpoint, inc. IMP/August, Seminar dec. 3 1990, Houston Texas.
- 93.- Shanley Agnes, "**Advanced process control: ingenious, yet accessible**", Chemical engineering, vol. 102, no. 5, may 1995, pp. 28-31.
- 94.- Shridhar Rahul & Cooper Douglas, "**A novel tuning strategy for multivariable model predictive control**", ISA TECH/ EXPOTECHNOLOGY UP DATE, Vol. 1, part. 5, Future technology for measurement and control, Anaheim convention, California, october 7-9 1997, pp. 1-10.
- 95.- Smith Carlos A., "**Control automático de procesos, teoría y práctica**", 1ª reimpresión, Limusa, 1994, pp.18-19.
- 96.- Smith Dave, "**DCS/SCADA system meets Wytch's need**", C&I, vol. 24, no. 1, january 1992, pp. 16.





- 97.- Sotelo Rene, Gordon Lewis & Jewart Charlie, **"Implementing advanced control on a copper grinding circuit"**, ISA TECH/ EXPOTECHNOLOGY UP DATE, Vol. 1, part. 5, Future technology for measurement and control, Anaheim convention, California, October 7-9 1997, pp. 157-165.
- 98.- Stanley M. Shinnars, **"Control systems design"**, Awiley international, 1969.
- 99.- Stephen P. Matthews, **"Process plant productivity improvement through neural network applications"**, ISA TECH/ EXPOTECHNOLOGY UP DATE, Vol. 1, part. 2, Productivity enhancement, Future technology for measurement and control, Anaheim convention, California, October 7-9 1997, pp. 157-166.
- 100.- Stephonopoulos, **"Chemical process control and introduction theory and practice"** New Jersey, Prentice-Hall, 1984, pp. 2,3,510.
- 101.- Studebaker Paul, **"How digital is digital?"**, Control for the process industries, vol. IX, no. 2, February 1996, pp. 78.
- 102.- Surya P. Chitra, **"Use neural networks for problem solving"**, Chemical engineering progress, vol. 89, no. 4, April 1993, pp. 49-52.
- 103.- Thur M. G., **"Interfacing analyzers to digital systems"**, Hydrocarbon processing, vol. 63, no. 6, June 1984, pp. 56-58.
- 104.- Treviño J.A., Mendez F., & Roldan J., **"La optimización en el control de procesos industriales"**, Ingeniería Química, agosto 1991, pp. 53-59.
- 105.-Tucker M. A., **"Process applications for microcomputers"**, Hydrocarbon processing, vol. 63, no. 2, February 1989, pp. 57-59.
- 106.- Ushio Shota, Short Herb & Johnson Eric, **"Expert systems, thinking for the CPI"**, Chemical engineering, vol. 95, no. 5, May 1988, pp. 26-29.
- 107.- Van Richard, **"How can new control methods improve pulp mill performance"**, ISA TECH/ EXPOTECHNOLOGY UP DATE, Vol. 1, part. 2, Productivity enhancement, Future technology for measurement and control, Anaheim convention, California, October 7-9 1997, pp. 1-15.



108.- Wallace Don & Ciambone David, **"HART simplifies advanced SCADA"**, INTECH, vol. 41, no. 6, june 1994, pp. 28-29..

109.- Wood Andrew, **"Expert systems take control a step forward"**, Processing, october 1986, pp. 43 y 45.

110.- Zak Friedman Y., **"Advanced process control: it takes effort to make it work"**, Hydrocarbon processing, vol. 76, no. 2, february 1997, pp. 17 y 144.

111.- Zielinski Martin, **"Digital communications: evolution or revolution"**, INTECH, vol. 38, no. 1, January 1991, pp.17.

112.- Zilberman Y., Bigman J. & Sela I., **"Use telecommunications for real-time process control"**, Hydrocarbon processing, vol. 75, no. 5, may 1996, pp. 91-98.

