



300618
UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE QUIMICA
INCORPORADA A LA U.N.A.M.

"EVOLUCION DE LOS SISTEMAS DE CONTROL
AUTOMATICO DE PROCESOS"

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A:
RICARDO LOPEZ BELTRAN

ASESOR DE TESIS:
ING. JORGE GARCIA ACEVEDO

MEXICO, D.F.
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1996

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

INDICE GENERAL

1.- INTRODUCCION

2.- ANTECEDENTES

- 2.1 Retroalimentación
- 2.2 La Automatización en la Industria
- 2.3 Efectos de la Automatización
- 2.4 ¿Porqué Medir y Controlar?

3.- INSTRUMENTACION Y CONTROL

- 3.1 Teoría del Control Automático
- 3.2 Sistema de Control de Circuito Cerrado
- 3.3 El Controlador Automático
- 3.4 Modos de Control más utilizados
- 3.5 Sistemas de Control Automático Compuestos
- 3.6 Tecnologías de Control Avanzado
- 3.7 Optimización

4.- EVOLUCION DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

- 4.1 Antecedentes del Control Digital
- 4.2 El Microprocesador
- 4.3 Sistemas de Control Distribuido

5.- NUEVAS TENDENCIAS DEL CONTROL DE PROCESOS

- 5.1 Sistemas Expertos
- 5.2 Sensores
- 5.3 Red de Campo (Fieldbus)
- 5.4 Una Visión del Futuro

6.- IMPACTO DE LA TECNOLOGIA DEL CONTROL DISTRIBUIDO

- 6.1 La Justificación Económica
- 6.2 Estudio de Beneficios

7.- CONCLUSIONES

8.- BIBLIOGRAFIA

INDICE DE FIGURAS

FIGURA		PAGINA
1	Sistema de Control Manual	11
2	Sistema de Control automático	11
3	Control Automático con Retroalimentación	13
4	Sistema de Control de Circuito Abierto	15
5	Sistema de Control Automático Sencillo	17
6	Sistema de Instrumentos Híbridos	20
7	El Concepto de la Transmisión	22
8	El Controlador Automático	23
9	Efecto Ganancia vs Banda Proporcional	24
10	Controladores de Acción Directa e Inversa	25
11	Controlador Flotante de Acción Directa	27
12	Controlador de Acción Derivada	28
13	Controlador de Dos Posiciones	29
14	Controlador PID	31
15	Dinámica de Retraso por Capacitancia	33
16	Dinámica de Retraso de Medición	34
17	Dinámica de Respuesta Instantánea	35
18	Dinámica con Retraso de Velocidad-distancia	36
19	Sistema de Control Directo	38
20	Diagrama de Bloques Control Directo	39
21	Sistema de Control en Cascada	40
22	Diagrama de Bloques Control en Cascada	40
23	Sistema de Control con Estación de Relación	41
24	Diagrama de Bloques Control de Relación	43
25	Control de Calentador a Fuego Directo	45
26	Diag. de Bloques Control de Impulso con Aviso de Señal	45
27	Sistema de Control con Rango Dividido	46
28	Diag. de Bloques Control con Rango Dividido	46
29	Sistema de Control de Predominio	49
30	Diag. de Bloques de Control de Predominio	49

FIGURA		PAGINA
31	Sistema de Control de Programa de Tiempo	51
32	Diag. de Bloques Control de Prog. de Tiempo	51
33	Sistema de Control de Punto Final	53
34	Diag. de Bloques de Control de Punto Final	53
35	Distribución de la Variación de un Proceso	59
36	Columna de Destilación Binaria	61
37	Respuesta Dinámica - Reflujo vs Impureza	63
38	Jerarquía de Control Avanzado y Optimización	68
39	Conjuntos Principales de un Sistema	79
40	Sistema de Control con Estructura de Comunicaciones Tipo Anillo	87
41	Sistema de Control con Estructura de Comunicaciones Tipo Bus	88
42	Sistema de Control con Estructura de Comunicaciones Tipo Estrella	88
43	Sistema Manejador de Base de Datos DBMS	92
44	Sistema de Control Distribuido	94

INDICE DE TABLAS

TABLA		PAGINA
1	Carga a la Planta de Etileno	131
2	Producción de Etileno	131
3	Temperatura de Salida de Serpentes de los Hornos - Horno 3	132
4	Temperatura de Salida de Serpentes de los Hornos - Horno 5	133

CAPITULO 1.

INTRODUCCION.

Desde que se desarrollaron los principios de la teoría del control ha existido una evolución permanente en las formas de ejecutarlos.

Esta evolución ha sido impulsada principalmente por las economías obtenidas normalmente a través de un control preciso de las variables de un proceso, las cuales llevan implícitos elementos tales como productividad, rendimiento, incremento en la seguridad, calidad, etc. En suma, factores todos que disminuyen costos y mejoran la economía del proceso industrial.

Factor importante ha sido, asimismo, la necesidad cada vez creciente de disminuir la variabilidad admisible en las condiciones del proceso.

Pese a que desde siempre los factores que controlan cualquier proceso industrial por complejo que este sea, son unos cuantos (concentraciones, flujos, temperaturas, presiones, catalizadores), sus interrelaciones entre más estrechamente se vigilen y cumplan harán posible llevar a cabo reacciones químicas y separaciones físicas cada vez más complejas y con grados de dificultad cada vez mayores.

No podemos dejar de mencionar que las necesidades de mejora tecnológica derivadas principalmente por la industria aeroespacial y resueltas a base de enormes inversiones, ha sido otro motor importante en el desarrollo de los sistemas y mecanismos que han permitido esta evolución.

Efectos de la Automatización

La llegada de la automatización ha tenido consecuencias importantes para las fuerzas económicas y laborales de los países industrializados.

Al obrero le ha traído efectos favorables y desfavorables. La producción masiva, lograda con la automatización, ha hecho asequible gran variedad de productos relativamente económicos y de calidad uniforme, contribuyendo a la implantación, en algunos países, de jornadas laborales más cortas.

De acuerdo con las condiciones reales de trabajo, su aplicación ha tenido, en general, efectos beneficiosos. Los trabajos pesados y peligrosos se hacen ahora automáticamente. Las fábricas son, casi siempre, más seguras y limpias, y los obreros están menos expuestos a los efectos nocivos de sustancias insalubres.

Así pues, en los últimos años, el término **automatización** se ha desarrollado en favor de los medios que describen cierto tipo de operaciones industriales automáticas. Para algunos ingenieros, automatización es **Instrumentación**; para otros, instrumentación es **automatización**. Para varios ingenieros, automatización es simplemente una extensión de **mecanización**; para otros, mecanización no se convierte en automatización a menos que haya **retroalimentación** presente. O es que la instrumentación de procesos es parte de la automatización? Esta pregunta podría contestarse en diferentes formas dependiendo del punto de vista que tenga cada quien y no es objetivo de este trabajo el filosofar al respecto -simplemente porque la respuesta no es importante para las consideraciones que haremos.

El objetivo de este trabajo es mostrar lo que la instrumentación de procesos es y la evolución que ha tenido a través del tiempo y, en un momento dado, los beneficios que el industrial puede obtener al actualizar sus instalaciones con un sistemas de control moderno.

CAPITULO 2.

ANTECEDENTES.

Cuando alguien pone ropa sucia en la máquina de lavar, la conecta y al regresar encuentra la ropa lavada, enjuagada y escurrida, está recibiendo los beneficios de la **automatización**, pues la máquina ha hecho una tarea que antes la efectuaba una persona.

La automatización ha entrado tanto en nuestra vida diaria que, por lo general, no la advertimos, salvo cuando algo se descompone. Los ascensores automáticos, la calefacción central, el aire acondicionado y el marcado telefónico directo son algunos ejemplos. Además, casi todo lo que usamos, desde los alimentos que ingerimos hasta los automóviles que conducimos, es producto de la automatización.

Esta se ha aplicado especialmente a la industria, lográndose así la producción en serie de mercaderías, en forma mucho más rápida y económica. Gracias a las computadoras, las máquinas autoreguladas especializadas realizan ahora en una sola y rápida operación, el corte de secciones complejas y de gran precisión. Ya no hay que interrumpir el trabajo para medir, comparar con las especificaciones correspondientes, rectificar errores y hacer los ajustes pertinentes. Los controles automáticos realizan continuamente todas esas tareas.

La automatización es un factor importante en la mayoría de las fábricas y en muchas oficinas. Bancos, compañías de seguros, tiendas y otros negocios confían a las computadoras facturación, contabilidad e inventario.

La automatización se extiende a nuevos campos. Por ejemplo, los hospitales modernos cuentan con complejos equipos automáticos que controlan las funciones vitales del paciente. También se están perfeccionando nuevas técnicas automatizadas para diagnosticar enfermedades: en los casos de lesiones cardíacas y para leer informes radiográficos, se usan computadoras y otros elementos similares.

La automatización, en el sentido de mecanización, comenzó a desarrollarse cuando el hombre primitivo empezó a utilizar herramientas para simplificar sus tareas. Pero la automatización en gran escala apareció sólo con la Revolución Industrial, hacia mediados del siglo XVIII y, en la acepción técnica del término, bien puede decirse que es, casi totalmente, un producto del XX.

Una de las primeras máquinas autoreguladas con un sistema de control automático la diseñó el ingeniero e inventor escocés James Watt (16), quien en 1787 inventó un *regulador* de la velocidad de su máquina de vapor.

Este regulador conocido como centrífugo o de bolas, estaba conectado con la máquina por medio de una correa y de una polea de transmisión. Consistía en una eje vertical sobre el que se cruzaban dos brazos como en un par de tijeras. Los extremos inferiores de esos brazos soportaban un peso. Cuando la velocidad de la máquina aumentaba, los brazos giratorios se abrían. En esa posición abierta accionaban un sistema articulado que, a su vez, disminuía automáticamente la provisión de vapor a la máquina, y ésta reducía su velocidad. A medida que el ritmo se volvía más lento, la fuerza centrífuga -que también había disminuido- dejaba que los brazos cayeran, lo cual aumentaba el abastecimiento de vapor y permitía que la máquina recobrara la velocidad. Así se lograba que aquella marchara automáticamente, a una velocidad más o menos constante. Con algunas modificaciones, ese regulador aún está en uso.

Otra innovación importante en el campo de los sistemas de control automático fue la invención del *motor de pilotaje*, hecha por el ingeniero británico Isambard K. Brunel. Este motor se usó para hacer girar los pesados timones de los vaporetos que cruzaban el océano. El barco de Brunel, llamado *Great Eastern*, botado en 1859, tenía un motor de este tipo.

En el mismo, una válvula de admisión, que se abría girando la rueda del timón, permitía la entrada de vapor a un cilindro. Un *sistema articulado continuo* sumamente ingenioso comparaba constantemente el ángulo del

timón con el de la rueda que lo dirigía, y cerraba el paso del vapor cuando aquél quedaba en la posición deseada.

Este motor primitivo fue el prototipo de los *servomotores* modernos. Estos dispositivos son motores que usan el principio de la retroalimentación para proporcionar distintas cantidades de potencia, según los requerimientos de un mecanismo de control.

Desde sus comienzos, la automatización evolucionó rápidamente. Las primeras máquinas automáticas podían hacer sólo un trabajo predeterminado. Luego, y por obra de continuos perfeccionamientos, se construyeron otras capaces de cumplir una serie de trabajos, ser manejadas por control remoto, determinar la calidad del producto y hacer las correcciones necesarias para eliminar los defectos de fabricación.

En los sistemas de control automático más altamente desarrollados, los posibles errores se corrigen sobre la marcha. En algunos, como por ejemplo en los sistemas de los vehículos espaciales, se evalúa constantemente la información proveniente del medio y los errores se corrigen aún antes que concluya la operación.

2.1 Retroalimentación

Aunque el término "automatización" se utiliza comúnmente en el sentido de mecanización, se le puede aplicar también una definición técnica más limitada. En este segundo sentido, el término "automatización" se aplica, específicamente, a las máquinas autoreguladas diseñadas para juzgar y corregir sus propias operaciones sin la intervención del hombre. Esto se logra mediante la *retroalimentación*, vale decir, la información sobre el producto final, que pasa a un dispositivo regulador, el cual, de ser necesario, modifica o corrige las operaciones en marcha. Para que un sistema de control se considere automático en el sentido técnico, es imprescindible que cuente con un mecanismo de retroalimentación.

Posiblemente este concepto se explique mejor mediante un ejemplo familiar, como el termostato de un sistema de calefacción automática. En éste, el termostato se gradúa a la temperatura deseada y a partir de ese momento, la calefacción funciona y deja de funcionar automáticamente, para que la temperatura de la habitación se mantenga dentro de los límites deseados. Cuando aquélla llega a un punto predeterminado, el termostato detiene la circulación de calor hasta que la temperatura baja de la marca fijada. Entonces, el termostato pone de nuevo en marcha el sistema de calefacción que funciona hasta que la habitación recupera la temperatura.

En este sistema, el termostato mide constantemente la temperatura de la habitación y envía señales de retroalimentación al sistema de calefacción. Se trata de una *sucesión cerrada*, una cadena circular de hechos, en la que todos los elementos del sistema son independientes.

La mayoría de los controles automáticos forman sistemas de serie cerrada. Pueden usarse para regular casi cualquier proceso mientras cumplan con tres requerimientos.

1. La cantidad controlada (por ejemplo, la temperatura) debe ser medible;
2. Debe contar con algún elemento que le permita regular esa cantidad
3. La medición y las regulaciones deben ser lo bastante rápidas para satisfacer las necesidades del caso.

2.2 La Automatización en la Industria

Algunas actividades industriales se adecúan más rápidamente que otras al control automático. La automatización se aplica más fácil y económicamente a la producción en gran escala de un solo artículo. Por ejemplo, la fabricación de piezas de máquinas y la producción de ciertos alimentos están altamente automatizadas. Por otro lado, las industrias cuyas demandas están sujetas a grandes variaciones estacionales o donde hay frecuentes cambios de proyecto, son difíciles de automatizar.

La interrupción en la continuidad de producción en algunas industrias puede arruinar el producto. En estos casos, los controles automáticos son muy valiosos. Por ejemplo, las plantas químicas y petroleras están casi totalmente automatizadas, desde la inyección de materiales crudos, pasando por las reacciones de procesamiento hasta el acondicionamiento final para el embarque. Las concentraciones químicas, el calor y la presión que deben persistir a través de todo el proceso son demasiado extremos, y, en consecuencia, requieren pruebas y adaptaciones constantes muy difíciles de lograr mediante el control humano. Los medidores y los sistemas de control de retroalimentación han resuelto el problema.

En estas plantas se requiere todavía la presencia de un pequeño grupo de ingenieros para vigilar, desde un cuarto de control central, la operación que se lleva a cabo. El producto final se examina en laboratorios independientes y los resultados se comunican a los ingenieros para que efectúen las correcciones necesarias en el proceso. Los nuevos métodos de análisis continuo de los productos terminados hacen que una cantidad cada vez mayor de operaciones de esos establecimientos sean del todo automáticas.

Las fábricas totalmente automatizadas trabajan sin necesidad de la intervención humana, salvo la de unas pocas personas que atienden la maquinaria si algo se descompone, o hacen los pequeños ajustes necesarios. Esto sucede especialmente en los procesos peligrosos.

Los controles automáticos son indispensables en la producción de energía atómica. Las personas no pueden trabajar demasiado cerca de los reactores nucleares por el riesgo de las radiaciones que acompañan la fisión de los átomos.

La regulación automática evita también la posibilidad de una explosión desastrosa provocada por un ligero error de juicio, o por la lentitud de muchas reacciones humanas.

2.3 Partes básicas de un Sistema de Control

Un sistema de control automático básico está formado de tres partes principales: la primera de **medición** y transmisión de la variable, la segunda de **comparación** o control de dicha medición contra un punto de ajuste, y la tercera de **manipulación** de la variable a través de un elemento final de control.

La evolución de cada una de estas partes ha sido distinta en cuanto a que el avance tecnológico ha sido aprovechado en forma diferente por cada una de ellas. En este trabajo me enfocaré a la parte de control, ya que es la que más desarrollo ha tenido en las últimas décadas. Los nuevos sistemas de control electrónicos han permitido utilizar esquemas de control más avanzados y complejos para operar las plantas cerca de sus límites críticos de diseño, explotando más su capacidad productiva.

2.4 Por qué medir y controlar ?

A final de cuentas, la mayoría de las ventajas que la instrumentación de procesos reclama, pueden resumirse en términos de economía. Instrumentos y controles inteligentemente aplicados generalmente permitirán la fabricación de un mejor producto a un menor costo y en un menor tiempo. Los instrumentos también se aplican ampliamente en términos de seguridad del personal y del equipo de operación.

Calidad del producto. La mayoría de los productos industriales son manufacturados para alcanzar ciertas propiedades físicas y químicas específicas. Conforme la calidad de un producto crece, las bandas de desviación de estas propiedades se estrechan y, conforme las bandas se hacen mas estrechas, la necesidad de instrumentos y controles se incrementa.

Podríamos citar algunos ejemplos de cómo la calidad del producto final está ligada con las condiciones de su manufactura:

La dureza, ductibilidad, resistencia a la corrosión y varias otras propiedades de un producto metalúrgico son representativos del cuidado que se tenga de 1º proporcionar el peso adecuado de los materiales en bruto y 2º de mantener adecuadamente la relación tiempo y temperatura del fundido, refinación y tratamiento térmico.

La pureza de un producto químico puede depender de 1º el manejo adecuado de ingredientes originales ya sea por peso o por flujo (volumen), 2º manteniendo la presión del reactor constante por un tiempo específico, y 3º ajustando el pH del producto final a través de la adición de un agente correctivo.

El peso, la resistencia y otras propiedades de un producto papelerero son parcialmente el resultado de 1º digerir la pulpa a la temperatura correcta, 2º controlar la presión de carga y la carga del motor, 3º controlar el nivel de líquido en el cabezal principal, 4º ajustar el pH de la mezcla pulpa/agua blanca, 5º mantener la velocidad correcta en la máquina de papel, 7º secar el papel a la temperatura y calidad adecuada, 8º prensar a la tensión apropiada y 9º almacenar el papel a la humedad mas deseable .

Los instrumentos, asimismo, aplicados a un proceso en particular, ayudan a mantener la calidad del producto, con uniformidad y esto solo puede resultar cuando las condiciones del proceso son mantenidas estrechamente, hora con hora y día con día.

Los controles automáticos no solo eliminan el trabajo penoso de mantener manualmente esas condiciones, pero además eliminan los riesgos de errores humanos y negligencias.

CAPITULO 3.

INSTRUMENTACION Y CONTROL.

Las plantas más grandes y complicadas, aquellas que alimentan a nuestra civilización de sus necesidades básicas: combustibles y electricidad, acero y plásticos, alimentos y agua, etc., descansan en la instrumentación, la que constituye los nervios y el cerebro de los modernos procesos industriales, para controlar la calidad del producto y mantener dentro del proceso las condiciones requeridas para una operación segura y eficiente.

Sin aparatos automáticos para medir y controlar, muchos de estos procesos no podrían simplemente existir, ya que los instrumentos pueden detectar condiciones y tomar acciones de control más rápido y más precisamente que el operador humano, y la verdad, la velocidad y complejidad de las plantas modernas es tal, que el hombre simplemente no podría darse abasto.

La utilización de la instrumentación reditúa beneficios económicos no solamente porque ahorra trabajo, sino también porque a través de un control más preciso y rápido se mejora la calidad del producto, se reducen desperdicios, y se permite que el proceso sea operado en su punto de mayor eficiencia; y no menos importante, es la contribución que la instrumentación del proceso hace al confort y dignidad de aquellos que trabajan en la industria, ya que los libera de muchas de las tareas más arduas y peligrosas.

Los sistemas de control de cualquier planta de procesos industriales, aún los de las más modernas, pueden reducirse en su forma más elemental a los esquemas de las figuras 1 y 2 siguientes.

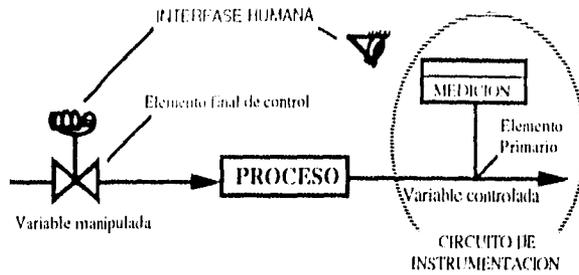


FIGURA 1 - SISTEMA DE CONTROL MANUAL
(Modificada de referencia 6)

En estos esquemas, un valor o cantidad (la variable controlada) está siendo continuamente medido y comparado con otro valor (el valor deseado de la variable), 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 una "interfase", para llevar a la variable controlada a los límites preestablecidos.

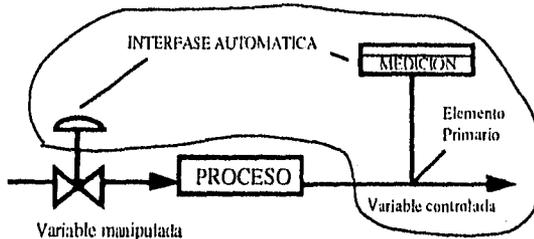


FIGURA 2.- SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO
(Modificada de referencia 6)

La planta o el proceso está casi siempre distribuido sobre una amplia área geográfica pero requiere de un control central y un centro de información (cuarto de control) para que pueda ser operado efectivamente y el operador pueda tomar acciones correctivas con inteligencia, cuando se presenten condiciones de emergencia o ajuste.

Los requisitos a cumplir : la distribución del proceso en una amplia área geográfica y el control centralizado en un cuarto de control demandan que la información de procesos típicos sea medida por transmisores colocados en campo y recibida en los receptores colocados en el cuarto de control.

Un transmisor generalmente transforma una variable del proceso (temperatura, presión, flujo, etc...) a una señal apropiada de salida, la que es transmitida al receptor. El receptor acepta la señal representando la variable de proceso, utilizándola para realizar determinado número de funciones de indicación y/o registro y/o control. El receptor puede también realizar operaciones algebraicas con la señal principal (tal como multiplicar, dividir, extraer una raíz cuadrada, etc...) para la utilización en los controladores, indicadores, registradores, etc.

La figura 1 representa un sistema de control con interfase humana o sea un sistema de control manual y en este caso el elemento primario y el receptor (la medición) forman el **círculo de instrumentación**. La figura 2 es el esquema del sistema de control con interfase automática, lo cual requiere de otro elemento, el **receptor controlador automático**, para formar el **círculo de instrumentación**. En este tipo de sistemas de control, el controlador automático no es sino un dispositivo inteligente (neumático, eléctrico, electrónico analógico o electrónico digital), y en la figura 3 se ve un diagrama más completo de este tipo de sistema.

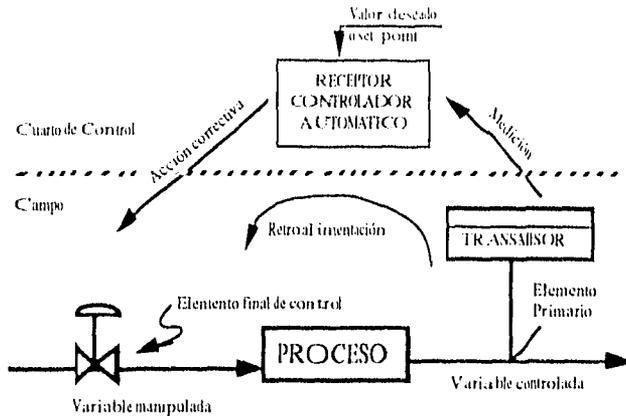


FIGURA 3.- CONTROL AUTOMÁTICO CON RETROALIMENTACIÓN
(Modificado de referencia 6)

Los circuitos de instrumentación pueden utilizar medios de actuación tales como presión neumática, hidráulica o corriente eléctrica, e inclusive pueden haber combinaciones de éstas; a estos dispositivos que forman los medios de medición y control se les conoce como **instrumentos**.

Son estos instrumentos en los circuitos de instrumentación los que han sufrido cambios más dramáticamente debido a los avances tecnológicos del s. XX. Las funciones de control se realizaron automáticamente, por ejemplo, en la década de los 30's cuando se comenzaron a transmitir señales en forma neumática, requiriendo de varios instrumentos dentro de un circuito de control para ejecutar funciones algebraicas o correctivas simples.

Hasta este punto hemos tratado en una forma muy general lo que son los instrumentos en el circuito de instrumentación, pero nos falta considerar el proceso, parte muy importante del sistema de control, y a través del cual se forma un circuito cerrado basado en el principio de la retroalimentación.

3.1 Teoría del Control Automático

Desde el punto de vista del control automático lo que interesa del proceso, del cual una definición puede ser: "el o los equipos en los cuales la variable va a ser controlada", son sus características dinámicas, o relacionadas con el tiempo y entre estas se pueden citar los retrasos (de capacitancia, de medición y tiempo muerto) y las perturbaciones y cambios de carga.

De acuerdo a las características dinámicas del proceso a controlar se establecen los **Modos de Control**, los que pueden ser definidos como "la forma matemática en que el controlador manejará el error para producir la corrección" a través del **elemento final de control**, de forma que la variable controlada quede dentro de los límites preestablecidos.

Los modos de control más utilizados son: el proporcional puro, el integral (también conocido como reajuste), y el derivativo. Estos modos de control pueden ser utilizados solos (con excepción del modo derivativo) o en combinaciones.

El modo de control *on-off* no es sino un caso particular del proporcional puro cuando la ganancia del controlador tiende a infinito.

3.2 Sistemas de Control

Un sistema de control propiamente dicho, puede definirse en un sentido mas amplio como: "un sistema dentro del cual un cierto valor o cantidad debe ser mantenido dentro de límites preestablecidos" (Tomado de referencia 6).

Matemáticamente:

$$\begin{array}{c} \text{valor ó cantidad} \\ | \\ \mathbf{A < E < B} \\ | \text{-----} | \\ | \\ \text{límites preestablecidos} \\ \text{menor} \qquad \text{mayor} \end{array}$$

y existen varias formas de implementar estos sistemas, dependiendo, como se mencionó, de la instrumentación con que se cuenta.

Así las cosas, los sistemas de control pueden dividirse en sistemas de control de circuito abierto y de circuito cerrado, los cuales serán ampliamente descritos a continuación.

3.2.1 Sistemas de Control de Circuito Abierto

El sistema de control de circuito abierto simplemente involucra la realización de un estimado de la forma o cantidad de acción necesaria para obtener un objetivo deseado, y su base radica en la predicción. No se hace una comprobación para determinar si la acción correctiva ha cumplido con el objetivo deseado.

Un buen ejemplo de un sistema de control abierto es el de una máquina lavadora automática. En este caso la persona que opera la máquina tiene un objetivo (el lavar una carga de ropa sucia), y lo compara con un nivel de referencia (el nivel preestablecido u obtener ropa limpia) y hace una predicción (ajustando el tiempo de lavado y agregando el jabón).

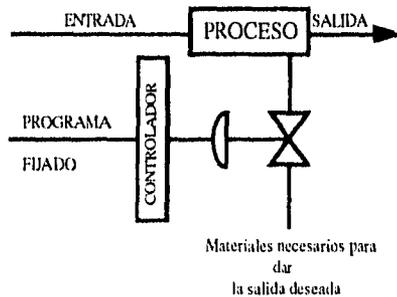


FIGURA 4.- SISTEMA DE CONTROL ABIERTO

El operador arranca la máquina, espera (dedicándose inclusive a otros quehaceres), en la suposición de que la predicción hecha conseguirá el

objetivo deseado. Si la predicción fue correcta en todos aspectos (cantidad de jabón, cantidad de agua fría y caliente, ciclo de tiempo, cantidad de mugre en la ropa, etc...) la ropa quedará absolutamente limpia y por lo tanto el sistema es capaz de un control perfecto. Sin embargo, si cualquiera de las variables que afectan lo deseado se desvía de la calidad o cantidad sobre la que se hizo la predicción, el sistema no dará un control perfecto (la ropa no quedará perfectamente limpia).

Dado que la máquina no hace una comparación final entre el resultado actual (el grado de limpieza de la ropa obtenido) y el resultado deseado (la ropa perfectamente limpia), cualquier error en la predicción (el programa fijado y los materiales necesarios) produce una diferencia entre resultados.

En nuestro sistema de control estudiado antes hemos supuesto que la predicción se hace automáticamente a través de un dispositivo que llamamos controlador y de una válvula de control; aunque dicha válvula se puede mover también a mano por el operador, y esto nos lleva a la segunda gran división de los sistemas de control de lo que también ya habíamos hablado antes: automáticos y manuales.

3.2.2 Sistemas de Control de Circuito Cerrado

La diferencia entre un sistema de control de circuito abierto y uno cerrado estriba en que en este último sí existe una comparación final y continua entre los resultados deseado y actual y si no son iguales (existe un error), el operador actúa para corregir el error a través de un elemento final de control (normalmente una válvula de control pero puede ser también un interruptor eléctrico).

Las figuras 4 y 5 son dos buenas representaciones gráficas de lo expresado anteriormente.

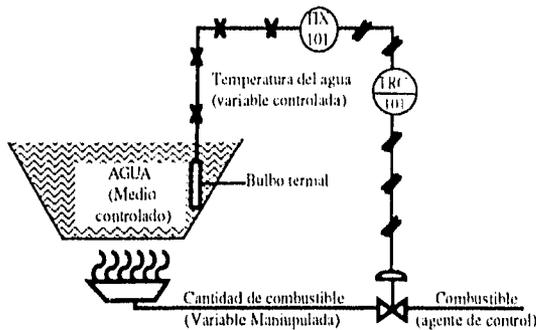


FIGURA 5.- SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO SENCILLO (Modificado de referencia 6)

En el área de los procesos industriales, la mayoría de las veces de tipo continuo, los sistemas de control de circuito abierto prácticamente no tienen aplicación, por lo que de aquí en adelante trataremos únicamente con los sistemas de control automático de circuito cerrado.

Por lo expresado anteriormente y de las figuras 4 y 5 podemos inferir que un sistema de control automático sencillo consta de las siguientes partes:

- 1) El proceso o sea el o los equipos en los cuales la variable va a ser controlada.
- 2) Una sección sensible que mide el valor actual de la variable controlada y la transmite al controlador automático.
- 3) Una fuente de referencia que suministra e indica el valor deseado de la variable
- 4) El controlador automático que opera para corregir si la variable controlada no está dentro de los límites prefijados por el valor deseado.
- 5) El elemento final de control que ajusta la variable manipulada de acuerdo a la acción correctiva del controlador automático.

De las cinco partes enumeradas, la primera, el proceso, no es un instrumento y lo que interesa de él son sus características dinámicas.

Las partes 2,3,y 4 si son instrumentos y pueden existir como una sola unidad (un instrumento) o por separado, pero cuando se interconectan forman un circuito (o lazo) de instrumentación.

La parte 5, el elemento final de control es normalmente una válvula automática operada por aire, aunque en otros casos puede operar hidráulica o eléctricamente.

El elemento final de control puede también ser en algunos casos un actuador especial, un interruptor o una resistencia variable.

3.2.3 El circuito de control automático sencillo.

El sistema de control representado en la figura 5 es un diagrama que liga distintas variables físicas pero en una forma caracterizada, por ejemplo: 3-15 lb/plg² de presión neumática, 4-20 mA de C.D., 0-100 lb/plg² de presión hidráulica, 1-5 VCD, que es el lenguaje que entienden los instrumentos.

El transductor transforma la variable de proceso a controlar a una forma de señal que pueda ser posteriormente fácilmente manejada como por ejemplo una presión diferencial, un desplazamiento, una señal de corriente, una impedancia o voltaje eléctrico, etc.

El transmisor transforma la señal generada por el transductor en una señal caracterizada que pueda ser manejada por el resto de la instrumentación.

De acuerdo con lo anterior, el diagrama deberá contener un cierto número de componentes que lo hacen sofisticado.

Si en la figura 5 eliminamos el bloque correspondiente al proceso y rearrreglamos y modificamos en cierta forma los bloques correspondientes a los instrumentos, obtendremos un diagrama como el de la figura 6, la que

nos representa prácticamente los instrumentos más usuales en un circuito de instrumentación sencillo y que son:

1. El transductor y transmisor, o sea el dispositivo que transforma la variable a medir y/o controlar en una forma de señal que pueda posteriormente ser manejada por el receptor.
2. El receptor que realiza la función necesaria, indicación, registro, control, alarmas o una combinación de todas y/o entre ellas; y
3. El actuador del elemento final de control que operará sobre la variable manipulada.

Estos instrumentos o grupos posibles de instrumentos se encuentran ligados entre sí por sistemas de transmisión que forman lo que podría considerarse como el **sistema de distribución**.

Las formas de energía que se utilizan en los sistemas de distribución de señales pueden ser de varias clases. En la figuras 7A, 7B y 7C se ve la diferencia entre estos tipos de transmisión utilizando un mismo elemento primario, en este caso un tubo Bourdon.

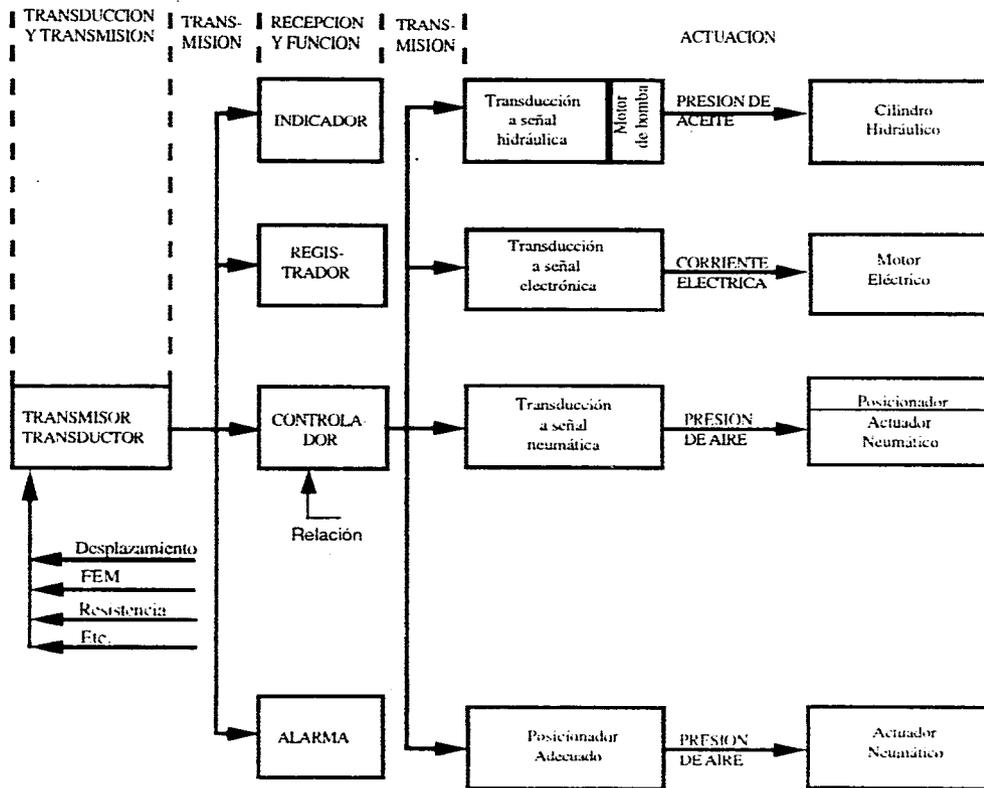


FIGURA 6.- ARREGLO DE UN SISTEMA DE INSTRUMENTOS CON POSIBILIDADES HIBRIDAS

3.2.3.a) Transmisión Mecánica. Este tipo de transmisión utiliza elementos puramente mecánicos como son: levas, engranes, palancas, etc... y se puede utilizar con provecho si la distancia entre el elemento transmisor y el receptor es muy corta.

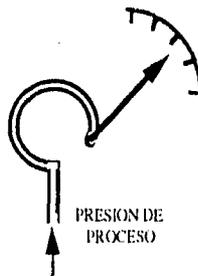


FIGURA 7A. TRANSMISION MECANICA

3.2.3.b) Transmisión Neumática. En este caso la señal se manda por medio de una presión de aire. Este sistema permite mayor flexibilidad en la transmisión, y es más versátil que el mecánico ya que el flujo de aire circula por un tubo de pequeña sección transversal y por ende poco peso con lo cual los cambios de dirección no ofrecen problemas como en el caso de la transmisión mecánica. Las distancias recorridas en este caso por la señal pueden ser mayores, aunque existen limitaciones debidas a las caídas de presión a lo largo de la línea de transmisión.

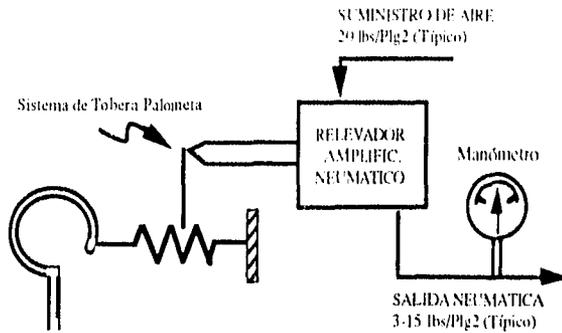


FIGURA 7B. TRANSMISION NEUMATICA

3.2.3.c) Transmisión Eléctrica. Esta transmisión tiene la gran ventaja de 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 ésta. La señal se transforma en una corriente o una diferencia de potencial eléctricos por medio de un transductor apropiado.

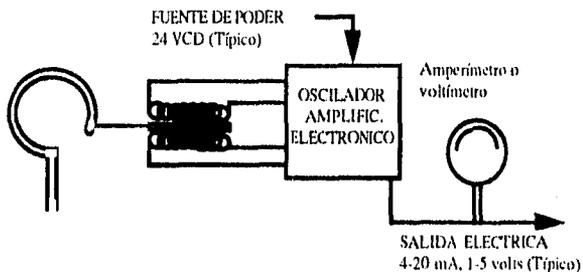


FIGURA 7C. TRANSMISION ELECTRICA

3.3 El Controlador Automático

El controlador automático es el corazón de todo sistema de control automático y puede ser definido como un dispositivo que maneja una entrada (desviación o error), para producir una salida que es función de la forma matemática en que ha sido programado.

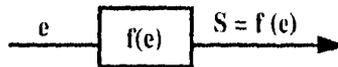


FIGURA 8.- EL CONTROLADOR AUTOMÁTICO

La forma matemática en que el controlador maneja la entrada es mejor conocida como **Modo de Control**, y de éstos existen varios que serán explicados a continuación.

3.3.1 Modos de Control Básicos

3.3.1.1 Proporcional Puro. Un modo de control proporcional puro es aquel en que la salida del controlador es proporcional a la entrada, o sea:

$S \propto e$; por lo que :

$$S = Ge + C \quad (1)$$

en donde G es la constante de proporcionalidad, en este caso la **Ganancia** del controlador; e es el error y está dado por la expresión:

$$e = E - P$$

siendo E el valor de la variable controlada, P el valor de referencia o *set point*, y C es una constante que depende de la calibración del controlador.

El rango de operación en el que se ejerce la acción de estos controladores la denominada **banda proporcional**, que es un porcentaje del rango total de la escala del dispositivo medidor.

La banda proporcional se puede expresar matemáticamente en función de la Ganancia como:

$$B.P. = \frac{100\%}{G} \quad (2)$$

O sea que es el porcentaje de escala completa a través del cual debe oscilar la variable controlada para producir una variación completa de la señal de salida. Observando esta ecuación se tiene que a mayor Ganancia la Banda Proporcional es más estrecha y viceversa. Este efecto se ve en la figura No.9.

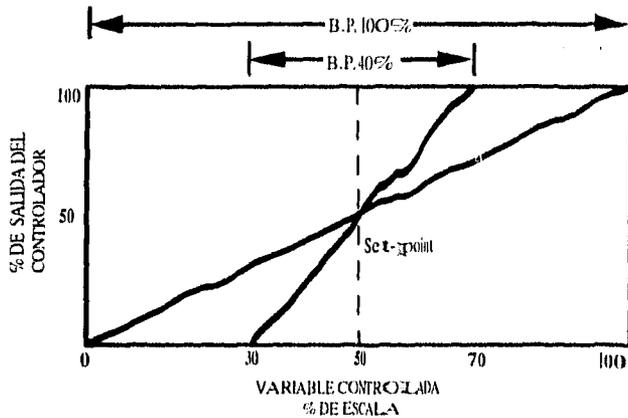


FIGURA 9.- EFECTO GANANCIA vs BANDA PROPORCIONAL

En el caso de la figura 9 se tiene que la constante de calibración del controlador está al 50% de la escala y es también el *set point*, ya que cuando el error es cero, el controlador está al 50% de la escala y dependiendo del valor del error sube o baja.

En la figura 10 se ve la acción del control proporcional de acción tanto directa como inversa al haber una variación de la variable controlada.

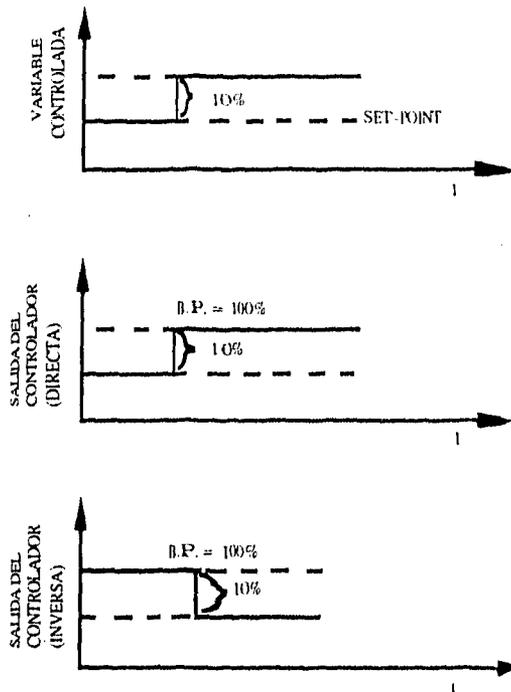


FIGURA 10.- CONTROLADORES DE ACCION DIRECTA E INVERSA

El controlador de acción directa es aquel que responde en el mismo sentido que las variaciones de la variable controlada; en cambio, el de acción inversa es el que tiene una acción contraria al sentido de la desviación de la variable controlada.

En ambos casos la salida del controlador es proporcional a las desviaciones de la variable controlada.

3.3.1.2. Modo Integral, flotante o de velocidad proporcional. En este modo de control el error es proporcional a la variación de la salida con respecto al tiempo, por lo que:

$$\frac{\partial s}{\partial t} \propto e \quad \text{y por lo tanto}$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = F e \quad \text{integrando tenemos:}$$

$$S = F \int e \partial t + C1 \quad (3)$$

En esta ecuación F es la constante de la acción flotante y C1 es la constante de integración.

En un controlador integral típico la acción flotante es afectada por dos factores:

- a) La desviación de la variable controlada, y
- b) La duración de esta desviación.

Mientras mayor sea la desviación y más tiempo dure, mayor será la acción de velocidad proporcional.

La acción del control integral se observa de la figura 11, para un cambio brusco en la variable controlada.

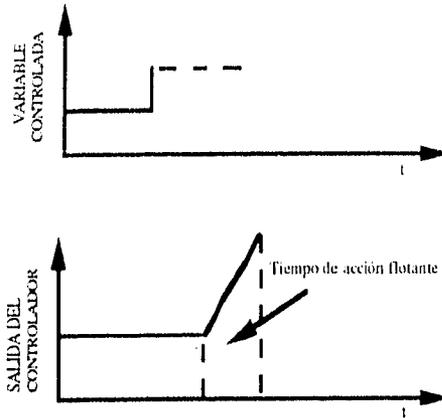


FIGURA 11.- CONTROLADOR FLOTANTE DE ACCION DIRECTA

3.3.1.3. Modo Derivativo. Este es un modo de control en el cual la salida del controlador es proporcional a la derivada del error; o lo que es lo mismo:

$$S \propto \frac{\partial e}{\partial t} \quad y$$

$$S = K \frac{\partial e}{\partial t} \quad (4)$$

En esta ecuación K es la constante de proporcionalidad de la acción de derivada. La salida es dependiente de la variación del error con respecto al tiempo.

Mientras más rápido sea el cambio en la variable controlada, mayor será la acción aplicada por el controlador. Este controlador corrige el retraso en tiempo del sistema, o sea, adelanta en tiempo dicha respuesta.

Este controlador puede ser visualizado como un amortiguador, ya que tiene una fuerza de restitución grande, correspondiente a una razón de cambio también grande en el desplazamiento y por lo tanto evita la oscilación. Sus efectos pueden verse en la figura 12.

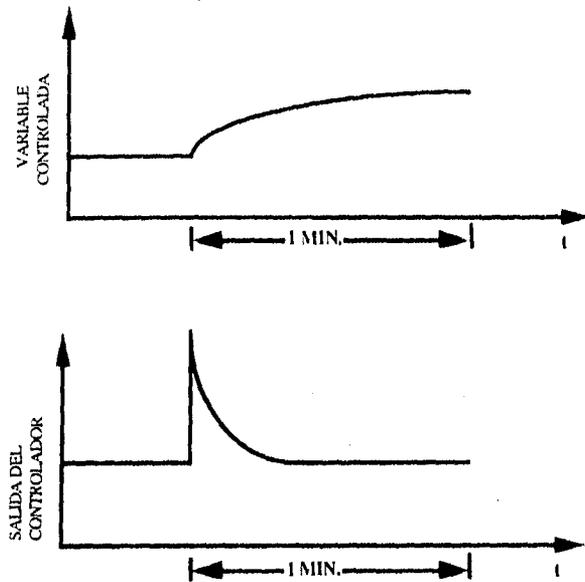


FIGURA 12.- CONTROLADOR DE ACCIÓN DERIVADA

3.4 Modos de Control más utilizados

Entre los modos de control más comúnmente utilizados en los procesos industriales se encuentra en primer lugar el proporcional puro, el cual ya fue ampliamente descrito en párrafos anteriores, aunque ofrece también dos modalidades que serán explicadas a continuación.

3.4.1 Dos posiciones (*On-Off*)

Si en la ecuación (1) se hace que la ganancia tienda a infinito (G/∞), se tiene que la Banda Proporcional tiende a cero ($B.P.\rightarrow 0$), de acuerdo a la ecuación (2), y la salida S del controlador tenderá a más o menos infinito ($S/\pm\infty$) según el signo aritmético del error (e) y en cualquier error de éste por pequeño que sea. De esta forma la salida del controlador será máxima o mínima, que es la condición de un controlador de dos posiciones.

El controlador de dos posiciones es meramente un conmutador que se mueve a una posición cuando el error es positivo (señal de *set point* menor que la de la variable controlada), y a otra posición cuando el error es negativo. Este modo de control se diseña generalmente para operar con una zona o banda muerta tan pequeña como sea posible, y cuando las posiciones no son las de completamente abierto o completamente cerrado, se conoce como control de "alto-bajo".

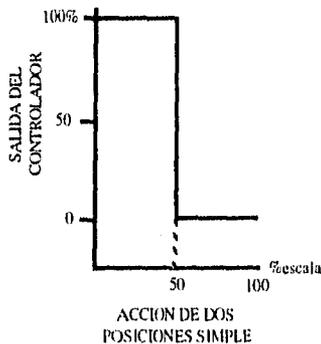


FIGURA 13. CONTROLADOR DE DOS POSICIONES (*ON-OFF*)

3.4.2 Modo Proporcional más Integral

Cuando a la acción proporcional pura se le suma la acción integral se conoce como control Proporcional Integral (PI), y la acción de la salida del controlador tiene la forma de:

$$S = Ge + Gr \int e \partial t + K1 \quad (5)$$

en donde r es el número de veces por minuto que se repite la acción proporcional (Rep/Min) y,

$$K1 = C \pm C1 \quad (6)$$

3.4.3 Proporcional más Integral más Derivada

El modo de control más sofisticado es aquel en que se suman tres acciones de control y en el que matemáticamente se obtiene:

$$S = Ge + \frac{G}{Tr} \int e \partial t + GT \frac{\partial e}{\partial t} + K1 \quad (8)$$

en donde $Tr = 1/r$ (minutos/repetición) (9)

La figura 14 muestra la acción de control de cada modo básico por separado y finalmente la suma total.

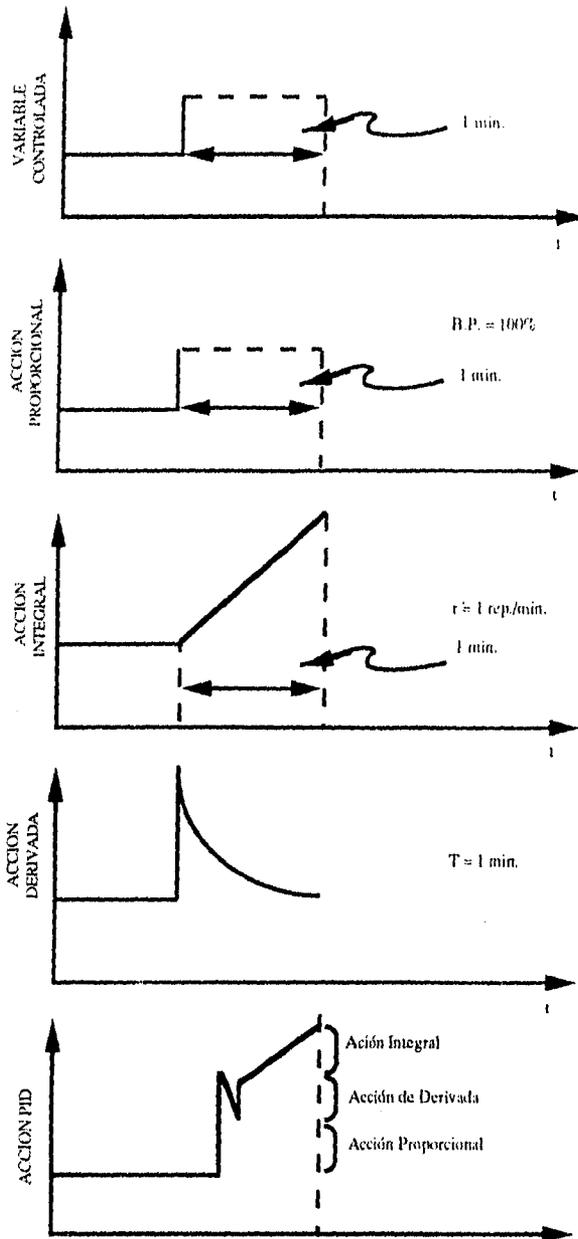


FIGURA 14.- CONTROLADORES P, I, D, PID

3.4.4 Modos de Control mas utilizados de acuerdo a las Características Dinámicas de los Procesos

Tipos de Comportamiento Dinámico de un Proceso. La selección de un modo de control está basada en la naturaleza dinámica y estática del elemento final de control, el proceso controlado, los disturbios y los elementos de medición. Generalmente el comportamiento de válvulas y elementos de medición es mucho más rápido que el proceso en sí mismo, de modo que solo es necesario considerar a este último. Algunas formas típicas de comportamiento dinámico de proceso se describen en los párrafos que siguen:

3.4.4.1 Retraso por Resistencia y Capacitancia

Este comportamiento se caracteriza por un efecto de amortiguamiento causado por el almacenamiento de fluido o energía en el proceso. Si la variable controlada es el nivel de un tanque con tiempo de almacenamiento relativamente grande, es claro que ningún cambio en el flujo de entrada puede ser causa de un cambio brusco en el nivel. Si la respuesta a un cambio en la entrada se muestra gráficamente aparecerá como en la figura No. 15. Nótese que el retraso en la capacitancia produce una respuesta inmediata pero inicialmente pequeña, que cuando se analiza resulta una curva exponencial de primer orden. Tal proceso puede ser controlado fácilmente por controladores *On-Off* (Banda proporcional muy estrecha) donde no es necesario el reajuste automático.

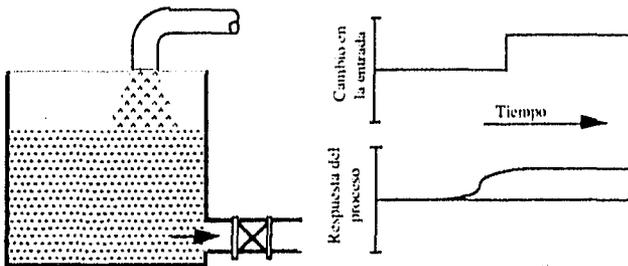


FIGURA 15.- DINAMICA DE UN PROCESO CON RETRASO POR CAPACITANCIA

3.4.4.2 Retraso de Medición

Este tipo de respuesta produce una contestación a un cambio en la entrada como se muestra en la figura No. 16. Inicialmente solo hay un cambio pequeño pero ocurre un incremento posterior hasta que se alcanza una pendiente máxima decreciendo posteriormente en una forma similar a la curva para el retraso de la capacitancia. La mayor respuesta viene mucho tiempo después en un sistema con retraso de medición, por lo que es una buena selección, generalmente, un controlador con acción proporcional mas derivada. La acción de la derivada no puede ser empleada si la señal del proceso es errática y "ruidosa" debido a que exagera su respuesta a cambios bruscos y amplía grandemente la componente de ruido de la señal; pero los sistemas con retraso de medición son por lo general circuitos de control que involucran cambios de calor y la señal de temperatura es plana y libre de ruido. La acción de la derivada siente la pendiente de la curva de respuesta y provee una corrección adicional a la válvula, mucho más rápido que la puede ser alcanzada con la acción proporcional solamente.

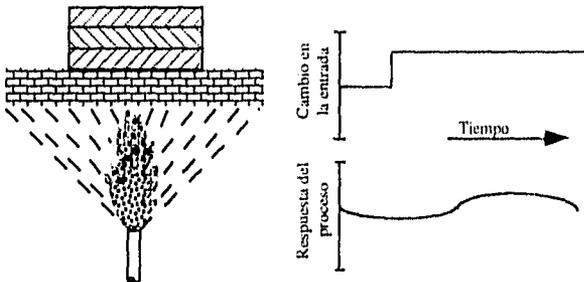


FIGURA 16.- DINAMICA DE UN PROCESO CON RETRASO DE MEDICION

Dependiendo de las condiciones particulares del tamaño de la válvula, rango de temperatura y capacidades caloríficas, el tamaño de la banda proporcional requerido para buena estabilidad puede ser de 10% o más; y si es éste el caso, debe agregarse reajuste automático para evitar la desviación asociada con ajustes de banda proporcional ancha; por lo que el controlador tendrá tres modos: Proporcional, Integral y Derivativo (PID).

3.4.4.3 Respuesta Instantánea.

En control de flujo y en la mayor parte de las formas de control de presión de líquidos, la variable controlada contesta a la variable manipulada inmediatamente (ver figura 17). Por lo tanto el único retraso remanente en el circuito es el debido a la válvula, medios de medición y elementos de transmisión; y aunque estos tienen respuesta rápida, pueden ser causa de que el circuito se comporte en forma inestable si las bandas proporcionales son menores de 125%. Tales sistemas, de este modo, siempre requerirán reajuste automático para evitar las grandes desviaciones que pueden ocurrir con tales bandas proporcionales tan amplias; por lo que los controladores proporcionales con reajuste automático son lo mejor que se puede seleccionar para control de flujo y presión de líquidos en tuberías.

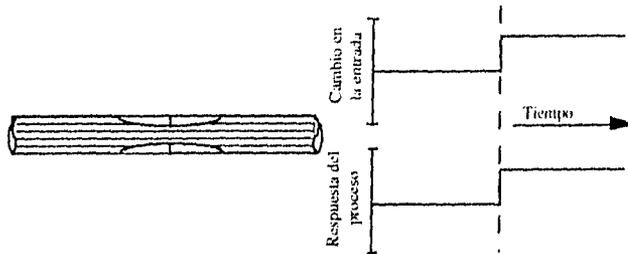


FIGURA 17.- DINAMICA DE UN PROCESO CON RESPUESTA INSTANTANEA

3.4.4.4 Retraso de velocidad-distancia.

Como se muestra en la figura 18, la respuesta del proceso puede consistir meramente de un desplazamiento en tiempo; y tales condiciones pueden ser causadas porque el elemento de medición ha sido localizado a alguna distancia flujo abajo del punto de efecto de la variable manipulada; teniendo el fluido que gastar una cierta cantidad de tiempo en alcanzar el elemento de medición. A menudo el último puede relocalizarse para evitar el retraso velocidad-distancia (o tiempo muerto); y otras veces es necesario usar bandas proporcionales amplias y largos tiempos de reajuste.

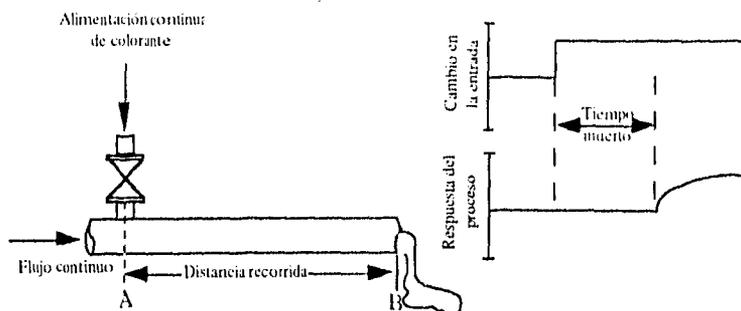


FIGURA 18.- DINAMICA DE UN PROCESO CON RETRASO DE VELOCIDAD DISTANCIA

El modo derivativo no es una acción buena para procesos con respuesta de tiempo muerto y mas bien, en cierto casos, un control integral puro (reajuste), se ha encontrado apropiado; pero lo importante aquí es que no hay un buen esquema de control para este tipo de proceso. Una disturbancia nunca empezará a corregirse mientras no transcurra el tiempo muerto y lo mejor que puede hacerse es evitar las disturbancias mayores y abruptas si es posible.

3.5 Sistemas de Control Automático Compuestos.

Hasta este punto hemos analizado en forma más o menos amplia lo que son los sistemas de control automático sencillos, los cuales forman la herramienta básica de la instrumentación de todos los procesos industriales; sin embargo, existen ocasiones en que es necesario utilizar esquemas más complejos con el objeto de incrementar y mejorar la estabilidad del sistema. De estos esquemas trataremos enseguida.

3.5.1. De Cascada

Para ilustrar la necesidad de este sistema de control compuesto analicemos el ejemplo simple que aparece en la figura No. 19, que no es sino un control de temperatura de un recipiente calentado a vapor.

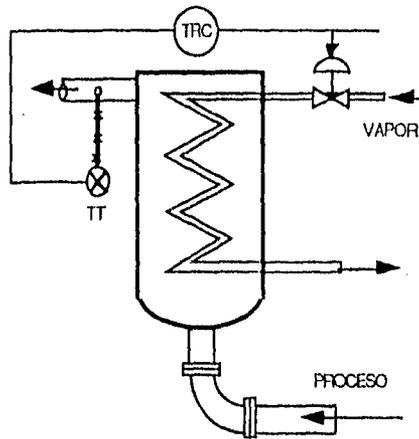


FIGURA. 19.-SISTEMA DE CONTROL DIRECTO
(Modificado de Ref. 6)

Aquí el elemento sensible a la temperatura se muestra en la descarga del calentador continuo, aunque podría estar sumergido en el líquido en el recipiente; pero en cualquier caso existe un circuito cerrado debido a que el controlador continuamente mide el resultado de su acción de control, la compara con el valor deseado (*set point*), y después hace las correcciones dependiendo de si existe un error, como se muestra en la figura 20.

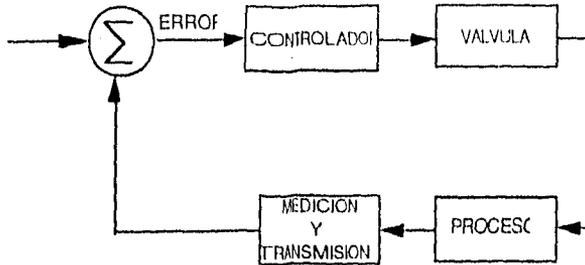


FIGURA 20.- DIAGRAMA DE BLOQUES CONTROL DIRECTO
(Tomado de Ref. 6)

Aquí podemos observar que la estabilidad de este sistema de control de temperatura dependerá principalmente de lo siguiente: 1) la constancia en la carga de vapor que puede verse afectada por la demanda de otro proceso dentro de la misma línea de servicios; y 2) el tiempo que transcurra para que el sensor pueda detectar totalmente el cambio de temperatura como consecuencia de un cambio de carga o de alguna otro disturbio (retraso de medición).

Ahora bien, aunque el controlador pudiera corregir los retrasos en la medición por medio de la acción de derivada (control "pre-act" o anticipatorio) no podría hacerlo por las variaciones en la demanda de vapor; y si estas persisten en el resultado será una oscilación en la variable controlada que pudiera eventualmente (en caso de ser de amplitud constante) ser tolerada en algunos casos, pero no en otros, existiendo inclusive el riesgo de que la oscilación se pudiera convertir en divergente (la condición ideal es la convergente) y el sistema se saliera totalmente de estabilidad.

Una de las técnicas para incrementar la estabilidad de un sistema de control como éste, es el de una cascada, la cual reduce el efecto de los cambios de carga próximos a su fuente y mejora, por otro lado, debido a la reducción del efecto de retraso de tiempo.

El sistema en cascada consta básicamente de un arreglo primario-secundario (maestro-esclavo), y como el ejemplo de la figura 21, un sistema de respuesta lenta es conectado en cascada con otro de respuesta rápida.

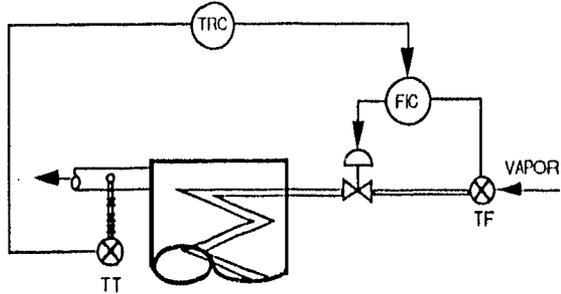


FIGURA 21.- SISTEMA DE CONTROL EN CASCADA (Temperatura-Flujo)
(Modificado de Ref. 6)

Los sistemas de control en cascada pueden ser de un solo controlador *maestro* ajustando los "set-points" de varios controladores *esclavos*.

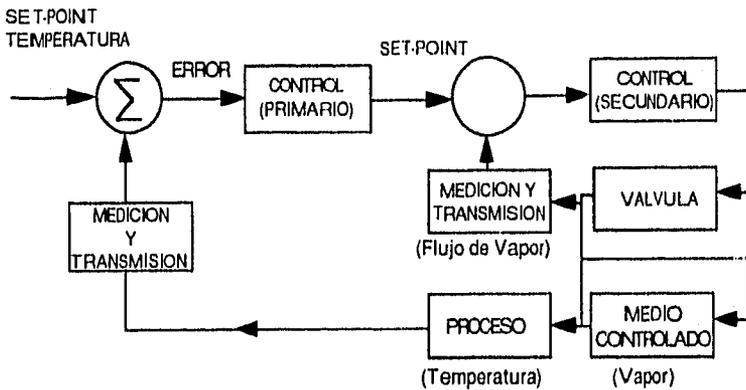


FIGURA 22.- DIAGRAMA DE BLOQUES CONTROL EN CASCADA
(Modificado de Ref. 6)

3.5.2 De Relación.

Los sistemas de control de relación incluyen varios tipos, encontrándose entre los más relevantes la Estación de Relación.

En este sistema una variable dependiente va a ser controlada en una relación directa con otra variable independiente, la figura 23 muestra un ejemplo de esto. El caso trata de la fabricación de ácido clorhídrico de una concentración constante por la absorción de cloruro de hidrógeno anhidrico en agua. El gas es el flujo independiente y el agua el flujo dependiente. El agua se introduce en la torre de absorción en forma de rocío y se mezcla íntimamente con el gas que entra por la parte superior de la torre. Para cualquier variación en el flujo de gas, existe una cantidad equivalente exacta de agregado de agua.

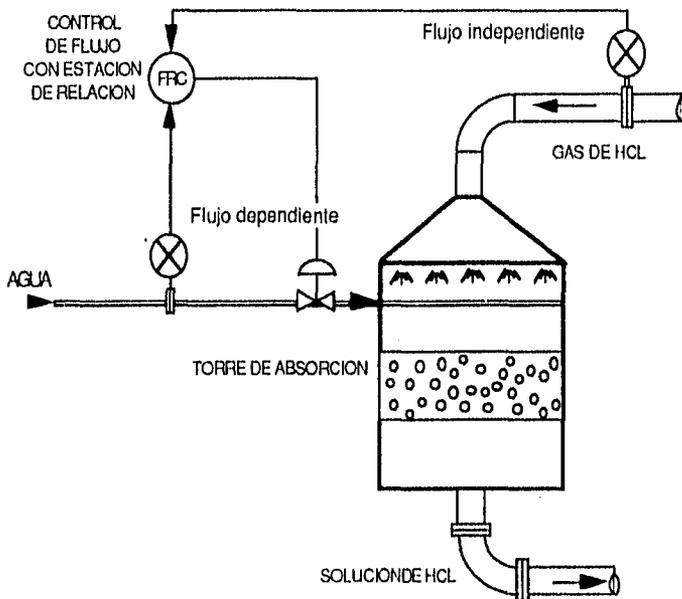


FIGURA 23.- SISTEMA DE CONTROL CON ESTACION DE RELACION

(Modificada de Ref. 6)

La unidad de control de relación es a menudo un instrumento separado (estación de relación) aunque puede integrarse en un instrumento de caja grande. La señal del transmisor independiente es relacionada (o multiplicada) por un factor que se ajusta en la estación de relación ya sea manual o automáticamente, y este valor se convierte en el *set-point* del controlador dependiente. Este último controla la válvula para seguir exactamente la demanda relacionada del transmisor independiente.

El ajuste del relevador de relación es una función de los rangos relativos de los transmisores y la fórmula para calcular dicho ajuste es:

$$\text{Lectura del Indicador de relación} = \frac{R_c \cdot C_v}{R_v \cdot C_e}$$

en donde R_c = flujo controlado (dependiente)
 R_v = flujo no controlado (independiente)
 C_v = capacidad máxima del transmisor de proceso no controlado
 C_e = capacidad máxima del transmisor de proceso controlado

Como un ejemplo se puede considerar el caso de que el flujo del transmisor independiente tiene el doble del rango del dependiente, y que se desea que el flujo dependiente sea exactamente el 25% del flujo independiente para cualquier ocasión.

Entonces:

$$\text{Lectura del indicador de relación} = \frac{R_c \cdot C_v}{R_v \cdot C_e} = \frac{1 \times 2}{4 \times 1} = 0.5$$

Existen tres limitaciones para el uso de controles con estación de relación:

- 1) ambas señales deben tener las mismas unidades de ingeniería (m^3/hr , kg/hr , etc...)

- 2) deben tener las mismas características (de raíz cuadrada o lineales)
- 3) la habilidad para medir del transmisor en forma precisa debe ser la misma (gamabilidad), como por ejemplo flujos de 1 unidad a 5 unidades.

Las dos primeras limitaciones son relativamente fáciles de cumplir, la primera por razones obvias y la segunda porque las unidades comerciales se fabrican bajo esta condición; pero en cambio la tercera si puede crear algunos problemas.

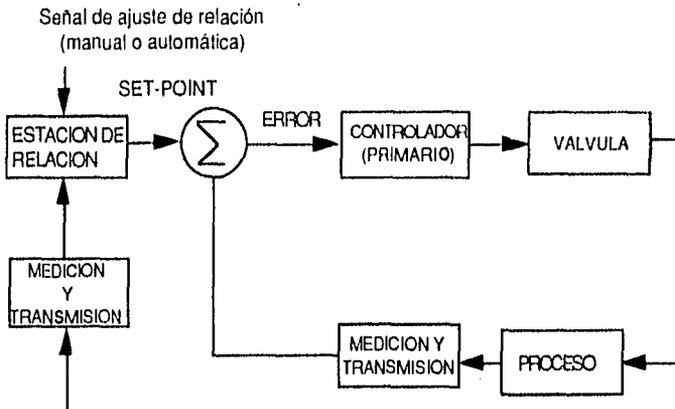


FIGURA 24.- DIGRAMA DE BLOQUES CONTROL DE RELACION

(Modificado de Ref. 6)

Si en el problema que ejemplificamos anteriormente suponemos señales de raíz cuadrada y la señal del transmisor independiente cae abajo del 50%, el *set point* del controlador secundario será menos del 25%, lo que creará problemas para mantener dentro de este valor la variable controlada debido a las limitaciones inherentes de precisión del medidor.

En el caso de los controles con estación de relación el transmisor independiente puede relacionar varias componentes dependientes con el uso de también varias estaciones de relación, lo que permite la solución a problemas como del tipo de mezclado de gasolinas de varias componentes.

La relación puede ser ajustada automáticamente en muchos circuitos de proceso, siendo caso típico el control de flujo de aire/flujo de combustible en una caldera.

3.5.3. De Impulso con aviso de señal

Los sistemas que tienen largos tiempos de retraso sufren la desventaja de que el controlador trabaja con una señal de proceso que no representa la condición real de éste. Los cambios de carga no son detectados contra-actualmente y por lo tanto la corrección es retrasada a menudo ocurriendo cuando ya no se necesita debido a que el cambio de carga ha sido eliminado. Un calentador de fuego directo (ver figura 25), a menudo tiene el problema de que el flujo que viene de un proceso previo puede variar considerablemente y los largos tiempos de retraso debidos a la longitud de los serpentines, hacen que el control de temperatura nunca sea preciso. La temperatura que está siendo detectada a la salida de un serpentín, no da una indicación real del posible cambio de temperatura que puede desarrollarse en el siguiente instante debido a un cambio de carga.

En el calentador, la temperatura de salida del producto es regulada por un controlador en la salida de la línea de carga; y si el flujo decrementa debido a un cambio en la operación del proceso previo, habrá algún tiempo antes que el decremento en flujo resulte en un aumento en la temperatura del producto. Cuando el controlador de temperatura finalmente comienza a corregir cortando el combustible, el flujo puede haberse re-establecido de modo que se necesite más calor que el actual en dicho punto. El proceso por lo tanto, podría tender a fluctuar y nunca se mantendría el valor correcto. Un relevador de impulso (que suministra acción de derivada o anticipatoria) suministra una acción de control de aviso (aviso de señal), que continuamente monitorea la señal de temperatura a la válvula de control. Si el flujo es constante, la temperatura es pasada a través del controlador sin cambio, pero si hay variaciones en dicho flujo, éstas son detectadas y sumadas o restadas de la señal de control de temperatura. De esta forma, los cambios de carga en el flujo son detectados y actúan inmediatamente sobre el elemento final de control para compensar por anticipado por cambios en la carga.

Es importante señalar que este sistema compuesto de control se aplica debido a que la carga del calentador es variable; pero si este no fuera el caso, y la carga fuera constante (como por ejemplo con un control de flujo en la carga), sería más conveniente la utilización, dependiendo el caso, de un control en cascada.

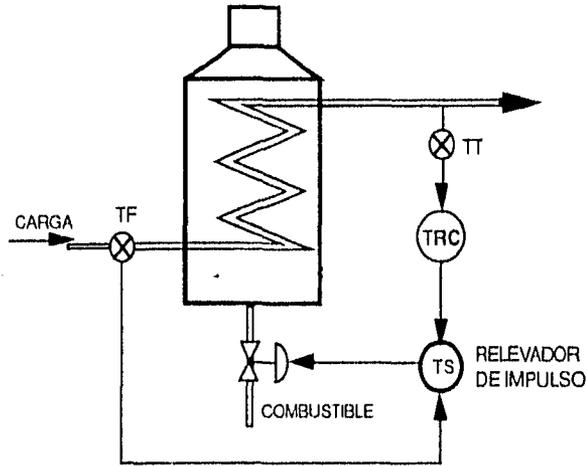


FIGURA 25.- CONTROL DE CALENTADOR A FUEGO DIRECTO
(Modificado de Ref. 6)

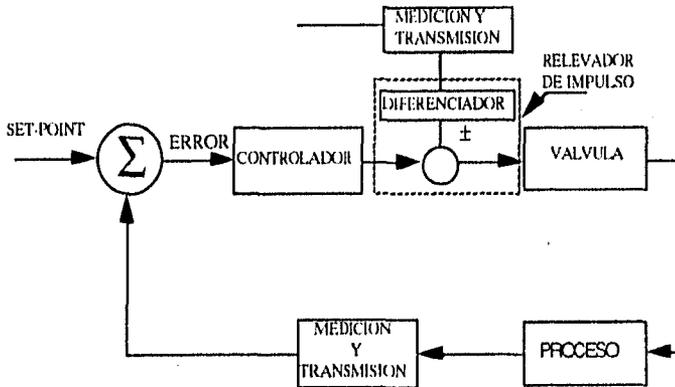


FIGURA 26.- DIAGRAMA DE BLOQUES DE IMPULSO CON AVISO DE SEÑAL
(Modificado de Ref. 6)

3.5.4 De Rango Dividido

Este es un sistema de control en el cual se realizan una serie de eventos definidos, para que una cierta variable manipulada pueda tener preferencia para el control de un proceso.

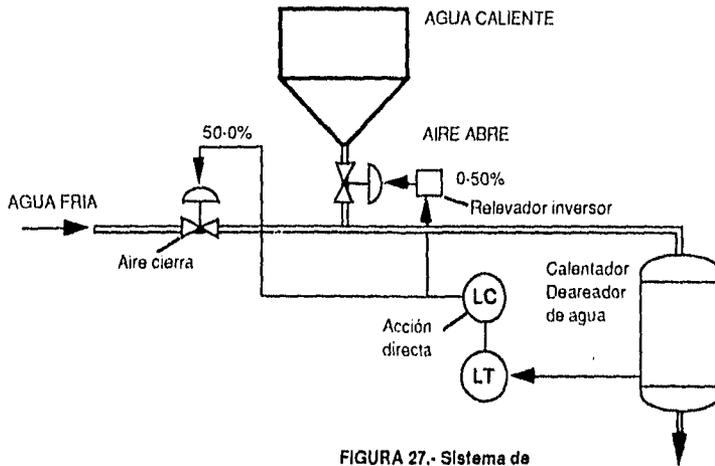


FIGURA 27.- Sistema de Control con Rango Dividido

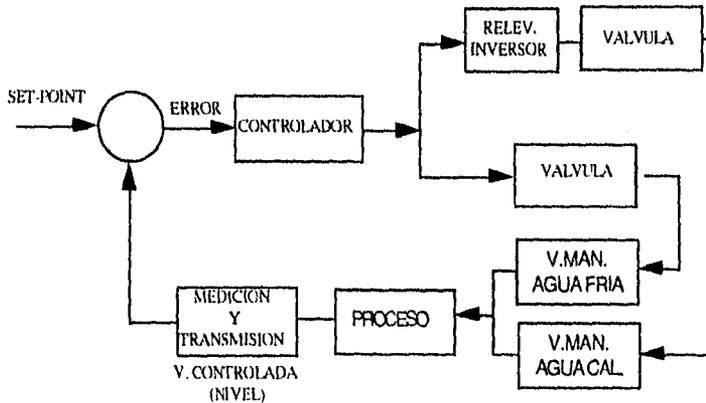


FIGURA 28.- Diagrama de Bloques Control con Rango Dividido

Lo anterior se ilustra en la figura 27 y en el diagrama de bloques de la figura 28. El sistema selecciona la mejor fuente de agua para un calentador de agua de alimentación. A medida que el nivel en el calentador de agua comienza a disminuir, agua caliente del tanque correspondiente se empieza a agregar para permitir cambios de niveles normales. El uso de agua caliente evita desajustes de temperatura en el sistema de deaeración que pueden causar dificultades en el proceso.

Sin embargo, si la demanda de agua deaerada pudiera persistir y el nivel continuara fallando, la línea de agua caliente no sería la adecuada por más tiempo; y en este punto se deberá agregar agua fría a la línea de servicios auxiliares.

En el caso de una falla en la señal de control, la válvula de agua caliente deberá cerrarse, y la de agua fría abrirse al mismo tiempo, para evitar un daño en el calentador. En esta forma, el contenido más valioso de agua caliente en el sistema no será desperdiciado.

Este sistema involucra la utilización de un rango de válvula de media escala y de un relevador inversor. También, la acción de la válvula se selecciona de modo que proteja contra una falla de la señal del control.

Cuando el nivel en el calentador de agua está en el tope del transmisor de nivel, resulta una salida de 100% que mantiene la válvula de agua fría cerrada. El relevador invierte la señal de modo que esta se vuelve mínima, y se mantiene cerrada también la válvula de agua caliente.

Cuando el nivel llega a media escala (50% de salida) la válvula de agua fría permanece cerrada y la caliente completamente abierta dado que recibe una señal que va de 0 a 50 % debido al relevador inversor. Si la cantidad de agua caliente fuera inadecuada para mantener el nivel arriba del punto medio en el tanque, la válvula de agua fría abriría hasta que la señal del transmisor del nivel fuera de 50 a 0%. En algún nivel mínimo en el calentador ambas válvulas estarían ampliamente abiertas.

Una falla en la fuente de potencia (electricidad, aire, etc...), dará por resultado que el sistema de agua caliente cierre su válvula para ahorrar su contenido; la de agua fría será abierta para prevenir daños en el calentador por sobrecalentamiento.

3.5.5 De Predominio

Algunas veces es necesario limitar el valor de una variable (valor alto o bajo) para evitar daños en el proceso o el producto, y en éstos casos se impone el uso de un sistema de control de predominio.

Ejemplos de estos pueden encontrarse en estaciones de bombeo donde a menudo el requerimiento es mantener dentro de límites seguros tanto la presión en la succión como también en la descarga de la bomba, como puede verse en la figura 29.

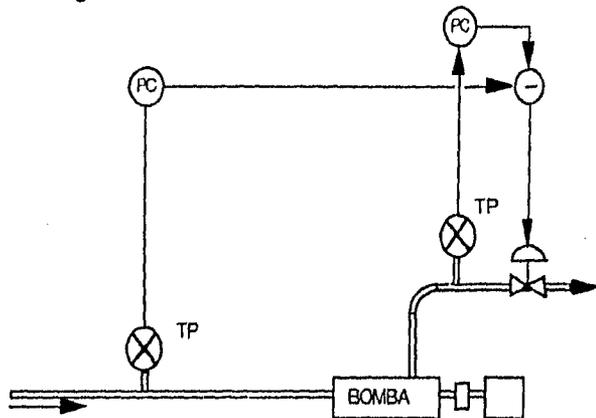
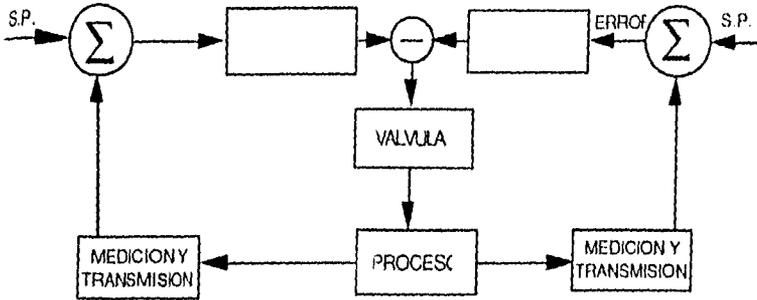


FIGURA 29. SISTEMA DE CONTROL DE PREDOMINIO

El sistema trabaja de modo que existe un circuito de control operando normalmente en una de las posibles variables, y continua de esta forma hasta que la otra variable llega a un cierto valor crítico. En este punto, esta última variable se convierte en el factor de control hasta que las condiciones críticas son remediadas. En la figura 30, las salidas de los dos controladores de presión están conectadas a un selector de baja señal, estando el *set point*

del controlador de succión abajo de la presión normal de operación; y su señal de salida estará a un máximo debido al error positivo con respecto al *set point*.



El controlador en la descarga es una unidad de acción invertida y tiene su *set point* a la presión de salida deseada. Consecuentemente su salida esta normalmente abajo de la del controlador de succión.

Como las dos señales de salida de los controladores van a un relevador selector de baja señal este último dejará pasar la más baja (en este caso la de la presión de descarga) bajo condiciones de operación normal. Sin embargo si la presión de succión cayera abajo de su punto de ajuste, la salida de su controlador de presión disminuiría, llegando a un valor menor que la señal de descarga. Consecuentemente, el controlador de presión de la succión, tomaría la acción sobre la válvula y aumentaría la operación satisfactoria.

3.5.6 De programa de tiempo.

Este sistema es una variante del de ciclo de tiempo, pero en el cual el *set point* del controlador es variado automáticamente sobre un cierto período, e incluye aplicaciones típicas tales como ablandamiento de acero, reacciones intermitentes para polimerización, procesamiento de hule y esterilización. Una situación típica que puede involucrar instrumentación en donde tanto el régimen de cambio del proceso como la duración de cualquier valor del "set-point" deban ser precisamente controlados; y un uso muy popular de este sistema de control se muestra en la figura 31, en el cual la instrumentación consiste de un circuito de retroalimentación completo con un control de "set-point" con aviso, actuando para guiar la variable del proceso.

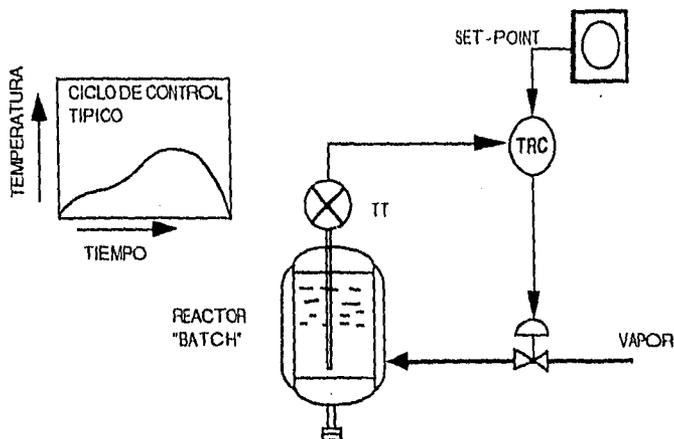


FIGURA 31.- SISTEMA DE CONTROL DE PROGRAMA DE TIEMPO

En tal sistema solo el controlador del circuito de retroalimentación contiene los modos de control, y el *set-point* desarrolla una señal predeterminada en proporción al valor deseado de la variable de proceso para todas las porciones del programa de tiempo. En algunas unidades el generador de la función y el controlador pueden estar contenidos en la misma caja. Se

deberá notar la utilización de un controlador registrador para tener un registro de la operación para propósitos de control de calidad.

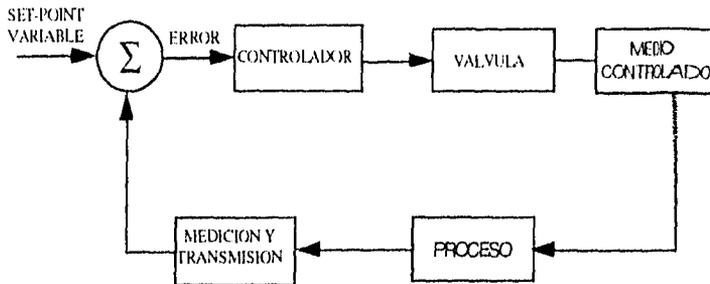


FIGURA 32.- DIAGRAMA DE BLOQUES CONTROL DE PROGRAMA DE TIEMPO

3.5.7 De Punto Final

El control de punto final es una combinación de sistemas en cascada y de relación, con lo que se logra que la relación de la variable dependiente (o controlada), a la variable independiente (o no controlada), sea automáticamente ajustada por la variable final del proceso.

Una aplicación típica se muestra en la figura 33, y aquí un analizador de punto final se usa para medir y controlar los dos ingredientes que formarán el producto que se quiere mezclar. El proceso involucra la neutralización de una corriente ácida por medio de otra corriente básica bajo el control del pH.

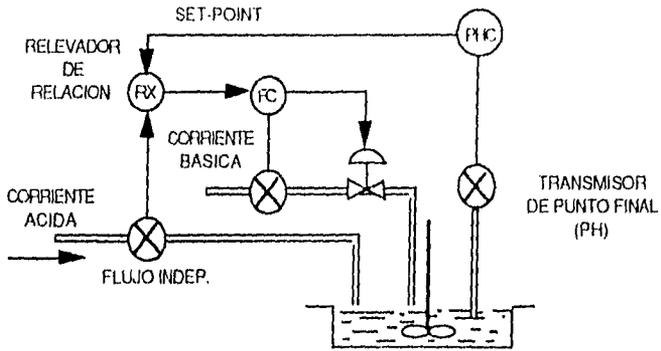


FIGURA 33.- SISTEMA DE CONTROL DE PUNTO FINAL (pH)

Cuando en el análisis del producto final se detectan cambios en el *set point*, la salida del controlador ajusta la relación automáticamente, de modo que los dos flujos son relacionados correctamente.

Aquí, la variable dependiente está bajo control con su *set point* determinado por el relevador de relación.

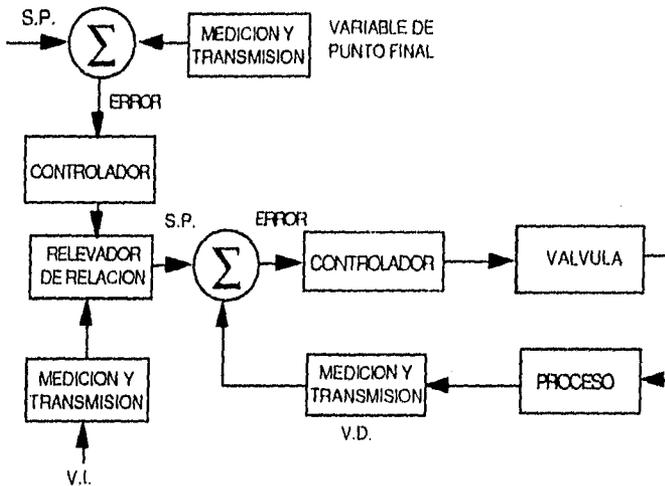


FIGURA 34.- DIAG. DE BLOQUES CONTROL DE PUNTO FINAL (pH)

3.6 Tecnologías de Control Avanzado

Las aplicaciones de control avanzado típicamente utilizan los siguientes enfoques fundamentales:

- La estabilización de las operaciones del proceso
- El control de los variables de proceso más fundamentales para la operación de la unidad en vez de las variables controladas por la instrumentación convencional existente.
- La aplicación de control multivariable que permite interacciones entre variables y permite la operación en los límites o restricciones del sistema
- Las operaciones cambiantes o inestables que coincidan con las condiciones óptimas de operación (optimización).

Nótese que los límites de restricción incluyen tanto restricciones físicas, como la potencia y presión de descarga de las bombas, como restricciones debido a las especificaciones del producto, como los puntos de ebullición y las impurezas. Para lograr beneficios económicos, el sistema de control avanzado se basa en los siguientes 5 puntos principales:

- La habilidad para detectar y responder de una manera rápida a los cambios en el proceso
- La ventaja de una vigilancia continua y constante
- La habilidad de calcular y manipular variables
- La habilidad de coordinar operaciones de control de una manera concurrente (casi simultáneamente)

- La adición de la inteligencia y experiencia humana en el sistema de control del proceso.

Los primeros tres puntos son características comunes de la gran mayoría de los sistemas de control. Sin embargo, incorporando la experiencia, inteligencia y tecnología del diseñador humano en el sistema de control avanzado es esencial si el tercero y cuarto incisos quieren ser explotados para máximos beneficios. Sin la inclusión y la sinergia de la experiencia, inteligencia y tecnología, el control avanzado sería una calculadora muy rápida. Es la experiencia en el control y la tecnología lo que identifica las variables del proceso fundamentales, los cálculos, los usos y los interrelaciones y la implementación necesaria para que el sistema de control de proceso avanzado inteligente sea un éxito.

El control avanzado logra la estabilización del proceso por medio del hábil uso de las características de la computadora, los cálculos del proceso y los modelos conjuntamente con el uso de la retroalimentación (*feedback*), anticipación (*feed forward*), y las mediciones clave para compensar los disturbios del proceso. La estabilización del proceso es la reducción en magnitud de la variación de las variables clave. La variable clave es por lo general una variable fundamental que era antes inaccesible para el control utilizando instrumentos convencionales (o un sistema distribuido). La estabilización del proceso mejora la calidad del control y hace que el proceso sea menos susceptible a disturbios. La compensación anticipatoria (*feed forward*) hace que el proceso sea menos susceptible a disturbios no previstos o secundarios, mientras que la compensación predictiva permite un mejor control basado en disturbios predecibles.

El control de la gran mayoría de los variables fundamentales del proceso permite una detección mas rápida que en los sistemas convencionales y una respuesta a cualquier variación en la calidad del producto. Por ejemplo, en el proceso de destilación las variables que nos interesan son la composición del producto en vez de las temperaturas. Las variables fundamentales para el control avanzado se basan en cálculos de energía y masa, flujos internos, propiedades termodinámicas, cálculos en la composición (predicciones) y medición de composiciones.

El propósito del control por restricciones es mover y mantener un proceso frente a una restricción ya sea física, mecánica o de especificación. Una **restricción dura** es aquella que no puede o no debe ser violada, tal como un límite de presión máxima ó el límite de un nivel ó la potencia límite. Una **restricción blanda** es una restricción que no debería ser violada, pero cuya violación no pone en peligro al personal o al equipo. Debidamente implementado y diseñado, el control por restricciones da como resultado una operación óptima del proceso. Sin embargo, a veces es necesario utilizar modelos del sistema y optimización para determinar las condiciones óptimas de operación.

Aunque los beneficios del control avanzado varían para cada una de las diferentes unidades de procesos, la generalidad incluyen:

- Incremento en la capacidad de la unidad
- Reducción en el consumo de energía
- Incremento en la recuperación de productos más valiosos.
- Una respuesta moderada y flexible a los cambios de carga, calidades y cambios en las especificaciones del producto.
- Aumento en la confiabilidad del proceso

La información de operación normal de cualquier planta mostrará una variación. Esta variación es caracterizada por una media (ó valor promedio) y una distribución de la variación sobre el valor medio. La distribución esta caracterizada por la desviación estandard, S . Un beneficio del control avanzado de proceso resulta en reducir la magnitud de la variación que ocurre durante la operación normal de planta. Esta reducción permite mover el punto de operación más cerca al valor especificado (para cada punto de ajuste, restricción o valor óptimo). Esto se ilustra en la Figura 35. Esta figura es la ilustración típica de una distribución gaussiana normal para la desviación en la variable de la operación. La curva " A" representa la distribución para una variable de operación común que tiene un valor medio M_{sc} y una desviación estandard S_{sc} .

Con control avanzado de proceso (CAP), la variación de un proceso es reducida. La distribución resultante para una variable con el CAP se muestra con la curva "B", la cual también tiene un valor medio M_{sc} pero con una desviación estandar más pequeña S_{cc} . La variación reducida permite mover la operación más cerca al valor límite (valor objetivo). Los resultados se muestran en la curva "C". El nuevo valor medio dado debido al control avanzado esta dado por:

$$M_{cc} = M_{sc} \pm 2 (S_{sc} - S_{cc})$$

Este cambio en el control hacia un nivel de operación mejorado se lleva a cabo con un límite de probabilidad máximo del 97.7% del valor objetivo en la operación actual. La cantidad de cambio en el control esta dada por:

$$2 (S_{sc} - S_{cc})$$

El valor económico del cambio depende de los valores económicos de cada aplicación. En el caso de control de calidad del producto en una columna de fraccionamiento, los valores económicos dependen de la diferencia de precios entre las fracciones.

El uso de la tecnología de control avanzado permite la predicción y el control de los puntos de ebullición mas cercanos a los valores objetivo, reduciendo la variación en la calidad del producto y mejorando la separación del producto. El principal beneficio del Control Avanzado en el fraccionamiento es mejorar la separación del producto más valioso a expensas de otros de menor valor.

55

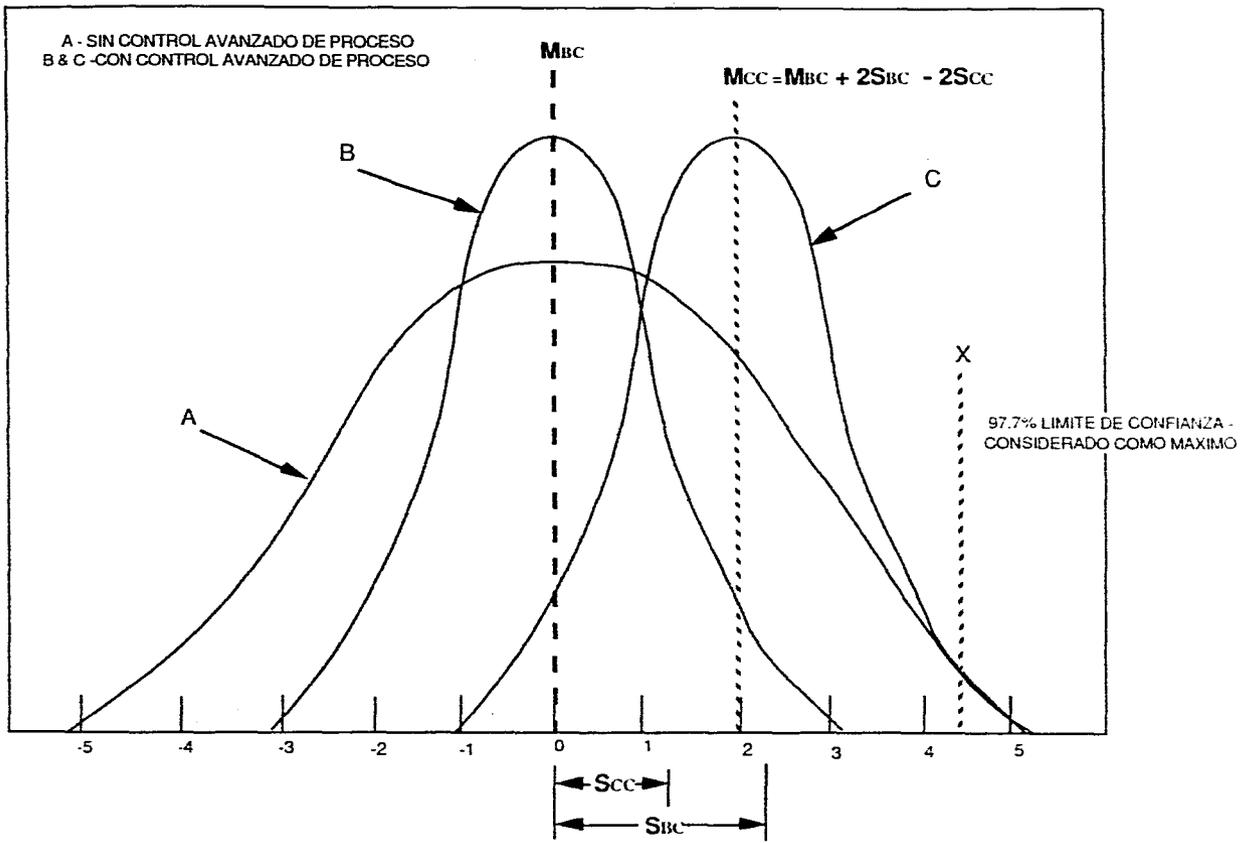


FIGURA 35 - DISTRIBUCION DE LA VARIACION DE PROCESO CON Y SIN CONTROL AVANZADO DE PROCESOS
Tomado de Ref. (15)

Las siguientes tecnologías son comúnmente usadas para control y optimización de procesos que envuelven múltiples variables y restricciones:

- Control Multivariable
- Control basado en Modelos
- Control Predictivo Multivariable
- Optimización en Línea basada en Modelos

Todos los métodos anteriores requieren de modelos,. Sin embargo, estos difieren en los tipos de modelos que utilizan, la plataforma de cómputo requerida y la cantidad de optimización que puede ser integrada con el control. Esto conduce a diferentes características y capacidades de cada tecnología y éstas tienen que adaptarse con el proceso específico para asegurar la compatibilidad de la tecnología con el problema de control. Adaptando la tecnología de control con los problemas de control de proceso, la aplicación implementada ya tiene las características deseadas de:

- Alto factor de servicio
- Alta relación beneficio/costo
- Facilidad de mantenimiento

Para explicar algunas de las principales diferencias entre los métodos de control arriba mencionados, primero necesitamos diferenciar entre los tipos de modelos.

3.6.1 Modelos

3.6.1.1 Modelos Estáticos o en Estado Estable: Estos modelos representan las ganancias de estado estable entre las variables de entrada (vgr. independiente) y salida (vgr. dependiente). Las ganancias de estado estable ayudan a determinar la suma total de los cambios requeridos en las variables de entrada para obtener los puntos controlados que se desean de las variables de salida. Por ejemplo, en la torre de destilación binaria mostrada en la Figura 36, la matriz modelo sería del tipo:

Variable Independiente	Impureza en Domo	Impureza en Fondo
Flujo de Carga	- 0.10	+0.18
Flujo de Recirculación	- 0.20	+0.15
Esfuerzo del rehervidor	+0.08	- 0.30

(nota: es práctica más común que las impurezas sean las controladas y no la pureza)

Para determinar estas ganancias en estado estable, puede no requerirse de hacer pruebas en planta. Estas ganancias pueden calcularse de simulaciones usando ya sea cálculos rigurosos o correlaciones.

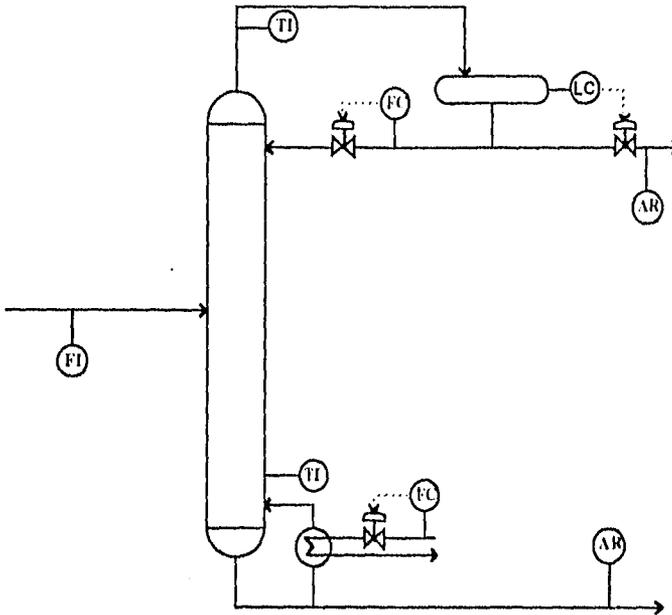


FIGURA 36.- COLUMNA DE DESTILACION BINARIA

Los modelos rigurosos están basados en principios y ecuaciones de transferencia de calor y masa y pueden representar el proceso sobre un amplio rango de condiciones de operación. Esto es de gran ayuda, especialmente si el proceso es no-lineal, lo cual puede dar como resultado diferentes valores de ganancia de estado estable en diferentes condiciones de operación.

Los modelos por correlaciones están basados en resultados observados. Y, a menos de que existan diferentes modelos de correlación para diferentes condiciones de operación, las ganancias de estado estable obtenidos vía correlaciones no pueden (en general) ser extendidas hasta condiciones de operación ampliamente diferentes de las condiciones de donde las correlaciones fueron desarrolladas.

3.6.1.2 Modelos Dinámicos

Estos modelos representan las dinámicas (o el patrón) tomadas por las variables dependientes para alcanzar su valor de estado estable cuando las variables independientes son manipuladas. Debido a este requerimiento inherente, la identificación de la respuesta requiere pruebas de planta reales en donde las variables independientes son perturbadas. La secuencia de perturbación depende del programa estadístico usado para identificar las relaciones entre las variables dependientes y las independientes.

Por lo mismo, en lugar de un valor sencillo como ganancia de estado estable entre una variable independiente y una dependiente, ahora tenemos como respuesta un vector de tiempo. La longitud del vector esta basada en el tiempo involucrado del proceso en estado estable (usualmente entre 30 a 120 minutos, sin embargo puede exceder los 240 minutos en algunos superfraccionadores). Una respuesta típica entre la velocidad de recirculación y la impureza del domo para la columna mostrada en la figura 36 puede representarse de la siguiente manera, en la figura 37:

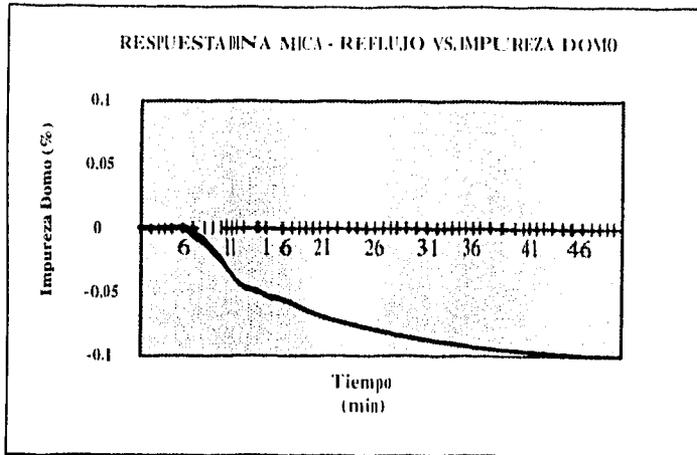


Figura 37.- Respuesta Típica Recirculación vs Impureza del Domo
(tomado de Ref. 15)

Estos modelos dinámicos son basados en correlaciones. Luego entonces, su utilización esta limitada a las condiciones de operación cercanas al punto de prueba de la planta. Normalmente, debido a la robustez de los algoritmos de control, estos modelos se pueden aplicar cómodamente entre un $\pm 10\%$ de variación de las condiciones de operación. Una desviación más amplia comúnmente resulta en un deterioro en el desempeño del controlador.

3.6.2 Controladores

3.6.2.1 Control Multivariable

Este controlador utiliza modelos de estado estable. Normalmente, las variables son desacopladas en su estado estable y el controlador implementa los nuevos puntos de ajuste en las variables manipuladas. Un algoritmo de tipo programa lineal puede ser usado si es que hay restricciones

(vgr. límites de rehervidor y condensador) que deben ser satisfechas. También se puede integrar en el programa lineal una minimización de costos. Si no hay restricciones ni aspectos económicos involucrados, es suficiente con simples ecuaciones algebraicas.

Este controlador es normalmente usado en donde la dinámica es muy corta (vgr. mezclado, hornos de etileno, etc.) y no hay respuestas inversas involucradas. Debido a los valores fijos de las ganancias de estado estable, su utilización está limitada a condiciones de operación cercanas las condiciones de diseño del controlador.

3.6.2.2 Control Basado en Modelo

De manera similar el Control multivariable, pero las ganancias son regeneradas vía un modelo. Esto incrementa su flexibilidad a un rango más amplio de condiciones de operación, ya que las no-linealidades del proceso puede ser incluidas en el modelo. Sin embargo, todavía tiene la desventaja de ignorar violaciones transitorias de restricciones y objetivos mientras se mueve hacia el estado estable si tales respuestas están presentes en el proceso.

3.6.2.3 Control Multivariable Predictivo

El término predictivo se refiere a la predicción de la trayectoria dinámica de las variables controladas conforme se mueven de su valor inicial hacia el estado estable. Es similar el control multivariable, pero en lugar de resolver el problema de control para el estado estable solamente, este se resuelve para cada intervalo (normalmente en intervalos de un minuto) a lo largo de la trayectoria. Si el estado estable es de 60 minutos, sería como resolver 60 problemas de control multivariable simultáneamente en cada intervalo. La ventaja aquí es que todo tipo de respuestas compleja (vgr. respuesta inversa, sobre-disparos, ganancia cero en estado estable, etc.) pueden ser consideradas y el control muestra más estabilidad y menos violaciones de objetivos y restricciones. De manera similar al anterior, un objetivo tipo minimización de costo puede integrarse con control.

3.6.3 Optimización En Línea Basada en Modelo

Al igual que el control basado en modelo, aquí se usan modelos de estado estable, pero su complejidad es mucho mayor. Por ejemplo, las correlaciones pueden ser usadas en control basado en modelo, pero la mayoría de los modelos optimizadores en línea son rigurosos. La ventaja del modelo en línea también incluye la capacidad de calibrar (actualizar) el modelo a las condiciones exactas del proceso antes de la optimización. También, aquí el objetivo de optimización es maximización de utilidad en lugar de minimización de costo. Este programa de optimización genera nuevos puntos de ajuste óptimos para el proceso los cuales son implementados (más comúnmente) por controladores predictivos multivariados. Luego entonces, dichos modelos son ejecutados con una frecuencia menor a la correspondiente al tiempo de estado estable del proceso.

3.6.4 Procesos Aplicables

En base a lo anterior, los siguientes son algunos ejemplos de aplicaciones de las diferentes tecnologías de control:

- | | |
|---|---|
| 1) Torre de Destilación Binaria | - Control Multivariable,
o Control Multivariable Predictivo
(si ocurren disturbios frecuentes). |
| 2) Torre de Destilación de
múltiple extracción | - Control Multivariable Predictivo |
| 3) Control de Severidad de etileno | - Control basado en modelo (preferentemente cinético) |
| 4) Mezclado | - Control basado en Modelo |
| 5) Control de reactores | - Control basado en Modelo, o
Control Multivariable Predictivo
(si las dinámicas son cortas) |

- 6) Control del "cracking" en refinación - Control Multivariable Predictivo
- 7) Optimización del "cracking" en re-finación - Optimización en línea basada en Modelo.

La tendencia actual es utilizar esta tecnología de Control Multivariable Predictivo (CMVP) dentro de las capacidades del Sistema de Control Distribuido, tomando ventaja de los últimos desarrollos en tecnología de microprocesadores, como las estaciones de trabajo RISC y las computadoras personales.

3.7 Optimización

La relación entre la rentabilidad de la planta, las variables de operación de la planta y las especificaciones de la carga en plantas ya existentes o de recién diseño, con frecuencia es difícil de determinar. Esta dificultad frecuentemente desemboca en una operación subóptima de la planta aún con el personal mas experimentado.

La operación en condiciones subóptimas puede ser muy costosa. Por esta razón, hay un fuerte incentivo para utilizar una herramienta precisa con la cual se puedan seleccionar las cargas de la planta y predecir aquellas condiciones de operación que llevarán al mejor desempeño de la planta. Esta herramienta de predicción debe ser capaz de expresar la rentabilidad de la planta como función de la carga, de la mezcla deseada del producto y de las condiciones de operación -- todas dentro de las restricciones y limitaciones existentes en el diseño. Idealmente, esta herramienta debería ser capaz de integrarse en el sistema de control avanzado y ser fácilmente entonable para mantener la precisión.

La optimización le permite a un ingeniero:

- Optimizar la rentabilidad de la planta
- Maximizar la producción de productos deseados

- Evaluar alternativas de carga para seleccionar aquella que resultare con máxima utilidad para la planta. Esta evaluación puede ser hecha para requerimientos de producción fijos o flexibles, para una disponibilidad limitada de cargas y con restricciones en parámetros tales como producción y conversión. Todas las evaluaciones consideran la carga, el producto y los costos de los servicios así como las restricciones en el equipo de planta.

Las optimizaciones en estado estable son programas relativamente lentos que tratan con cambios significativos a largo plazo en la operación de la planta. Reconociendo que la planta es una entidad dinámica, dentro de un ambiente con cambios rápidos, se proveen estrategias de **Control por Restricciones** para la gran mayoría de los sistemas.

La tarea del sistema de control por restricciones es reaccionar inmediatamente a cambios, ya sean transitorios o de largo plazo. El sistema de control por restricciones reacciona para mantener la operación de la planta en la región factible, alterando las variables necesarias. Por ejemplo, la pérdida de propano en el desetanizador puede ser en respuesta a la limitación de un condensador causada por un incremento temporal en la carga. La intención del control avanzado es mantener los puntos de ajuste (*set-points*) provistos por otros componentes del sistema.

Para el control por restricciones y el control avanzado, se promueve al máximo el uso del Sistema de Control Distribuido (DCS), el cual ofrece una plataforma redundante en hardware confiable para su implementación. Por razones de costo, conveniencia o limitaciones en la tecnología, algo del control por restricciones y del control avanzado pueden necesitar ser colocados en una computadora huésped. Para llevar esto a cabo se puede disponer de un paquete de programación avanzada para aplicaciones de control de procesos y para adquisición de datos, estructurado en bloques y que complementa las capacidades del sistema de control distribuido, según se necesite.

La figura 38 muestra como los diversos niveles de sofisticación en control interactúan y se construyen cada uno encima del otro.

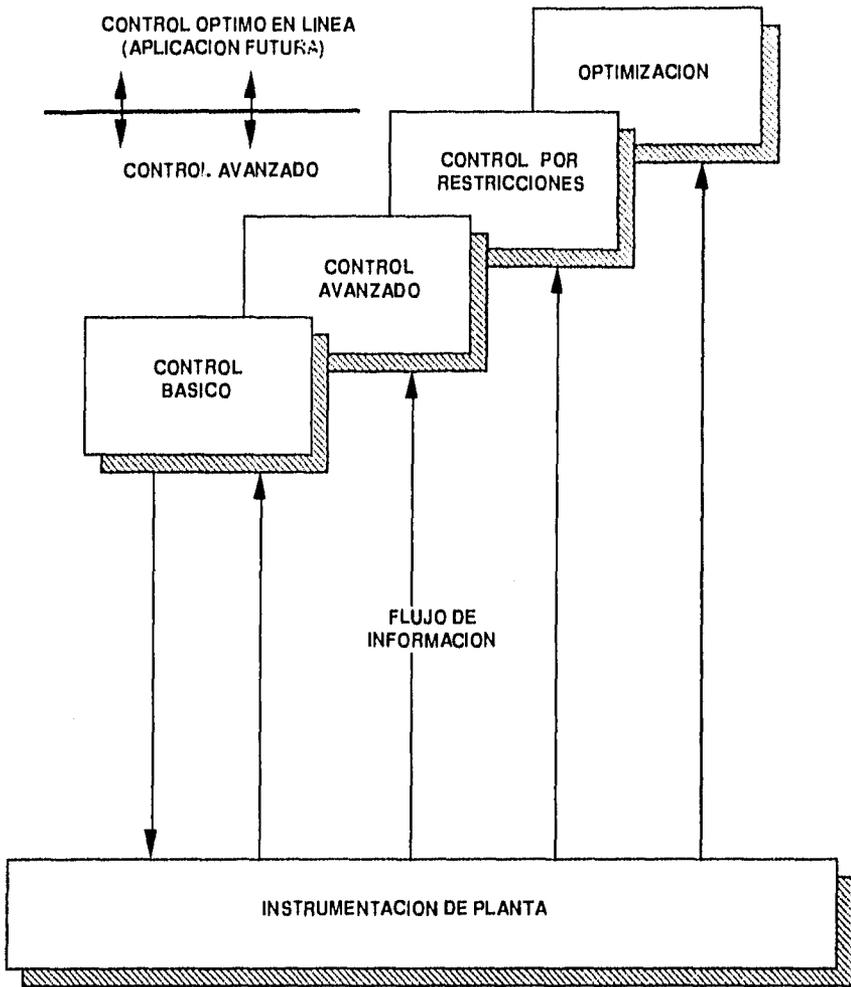


FIGURA 38.- JERARQUIA DE CONTROL AVANZADO Y OPTIMIZACION

CAPITULO 4.

EVOLUCION DE LOS SISTEMAS DE CONTROL.

4.1 Antecedentes del Control Digital

En la actualidad, como hace más de diez años, la instrumentación industrial sigue repartiéndose predominantemente entre: la electrónica, con sus variantes analógica y digital; y la neumática que es básicamente analógica. Los otros tipos, hidráulica, mecánica y demás, son para aplicaciones muy especiales.

La instrumentación neumática se ha mantenido principalmente por la facilidad con que puede entrenarse personal para su diseño, instalación y mantenimiento; pese a que se predijo su obsolescencia a mediados de la década de los 60's, lo que se ha verificado en cuanto a avance tecnológico pero no en cuanto a mercado, del cual retiene todavía un 30%.

Sus desventajas principales son: corto radio de acción y dificultad para acoplarse con la computadora digital electrónica, lo que la deja fuera de concurso en sistemas de control en complejos grandes y sofisticados.

En la instrumentación electrónica, el tipo analógico, que sigue siendo el más usado actualmente debido: por un lado, al buen conocimiento que se tiene de él; y por el otro, a que existe gran compatibilidad de marcas. La señalización de 4-20 mA de corriente directa sobre dos hilos, le dan gran modularidad e intercambiabilidad sobre la instrumentación neumática; además de el fácil acoplamiento a Instrumentación Digital, Computadoras, Computadoras de Planta (PC) y Sistemas de Control Digital.

En cuanto a la instrumentación electrónica digital (la Computadora) existe la posibilidad de que con las debidas modificaciones será el medio de control del futuro. Cuando este equipo realiza en línea el trabajo de controlar,

secuenciar y monitorear, permite al operador una mayor flexibilidad en sus labores. Usado en complejos industriales gigantes contribuye a la total integridad del sistema. Su mayor desventaja actualmente, entre otras, es la inversión en equipo (*Hardware*) y en programación (*Software*) y la necesaria formación de grupos de trabajo, diseño, operación, mantenimiento, que vayan ganando experiencia en esos aspectos.

Siempre existe un periodo de retraso y es muy variable en su duración entre el primer impacto causado por una tecnología y los cambios que seguirán en su desarrollo, por lo cual resulta peligroso pronunciarse con fiabilidad sobre las consecuencias. Como tal, tenemos el caso de la instrumentación neumática de la cual se predijo su obsolescencia hace más de 15 años, pero que aún continúa vigente, debido entre otras cosas, a la facilidad de entrenar personal. Sin embargo y a pesar de su corto radio de acción que la limita a plantas medianas y pequeñas, aisladas y aunque todavía deberá perder terreno en las aplicaciones de control, el factor de seguridad que implica el no trabajar con electricidad en zonas peligrosas, le darán una vida más prolongada aunque, al igual que la hidráulica y la mecánica, restringida a aplicaciones muy especiales.

En lo que corresponde a la instrumentación electrónica, podemos pensar que la tendencia es hacia el tipo digital, ya que desde la primera instalación a finales de los 50's, a mantenido un ritmo sostenido de aplicación que se ha vuelto exponencial, sobre todo en los últimos años. Basta ver con que frecuencia las revistas especializadas publican cambios y adelantos en equipos electrónicos. La razón de lo anterior podría explicarse ya que las operaciones industriales con control analógico, la tarea de integrar los controladores y la supervisión del proceso es responsabilidad del operador, el cual tiene que enfrentarse a una operación muy dinámica. Muchos controladores automáticos, cada uno actuando independientemente, y un gran número de factores deben ser interrelacionados, no solo en lo que se refiere a los aspectos de la química o la física del proceso, sino también económicos.

El análisis de los factores que intervienen en la interrelación, involucra muchas horas o días de cálculos complicados, laboriosos y tediosos si se hacen por medio de una calculadora de escritorio. Además, al completarse pueden ya no ser de utilidad debido a que las condiciones del proceso cambian rápida y frecuentemente.

Debido a lo anterior, puede decirse que desde el punto de vista práctico, el operador descansa en su juicio y experiencia para compensar los disturbios, tales como cambios en la composición de la carga, impurezas, cambio en las condiciones ambientales, etc., y que el retraso de tiempo en la detección de dichos disturbios y la inhabilidad humana para evaluar inmediatamente los cambios en los ajustes de los controladores, pueden ser causa de que se violen los límites de operación permitidos y no se mantengan las condiciones óptimas.

El significado de *óptimo* depende de una decisión administrativa y puede ser: máxima ganancia, máxima producción, mínimo costo o mayor calidad. Es en estos puntos donde se encuentra la justificación para la utilización de la computadora digital electrónica, ya que esta última, con su potencialidad para procesar grandes cantidades de datos de las mediciones necesarias y evaluar los cambios en un sistema complejo, es el operador ideal para las operaciones de producción.

La computadora digital electrónica, cuyos orígenes se remontan a los inicios del siglo XIX y cuya invención se atribuye a Charles Babbage (hasta donde resulta posible establecer el origen de un invento), había demostrado ser un instrumento muy eficaz para el manejo, procesamiento o intercambio de información, razón por la cual se pensó a finales de los 50's que podría ser el controlador ideal de los procesos.

Sin embargo, cuando se le utilizó como el corazón de un sistema de control digital centralizado, demostró tener problemas inherentes también, y el más grande de todos fue la confiabilidad. Si un controlador analógico falla en un sistema de control de procesos bien diseñado, la pérdida de control resultante no es muy seria. Si una computadora que está realizando el rol de

varias decenas de controladores falla, el resultado puede ser el paro total de las instalaciones de la planta.

De acuerdo a lo anterior, este sistema debía sufrir modificaciones para considerarse, como decíamos, el sistema del futuro; tal vez debería ser uno que conjugase las ventajas del sistema de control digital centralizado, con las ventajas del sistema de control analógico.

Una de esas modificaciones es hoy en día el resultado en la distribución funcional y geográfica que se logra con la utilización de un **Sistema de Control Distribuido**.

4.2 El Microprocesador

El crecimiento de la electrónica de estado sólido ha sido extremadamente rápido y penetrante desde sus orígenes, hace menos de cuatro décadas. El desarrollo de los microcircuitos ha disminuido el precio y tamaño de las computadoras digitales programables a un grado tal, que han revolucionado los diversos campos de aplicación de la ciencia y la tecnología; uno de los cuales, en particular, ha sido impactado sensiblemente: la automatización.

La continua mejoría en la precisión, confiabilidad, efectividad de costo y versatilidad del equipo de medición y control de procesos industriales, se debe en términos generales al avance de la tecnología de los semiconductores; especialmente, al desarrollo de su más reciente invención: **el microprocesador**.

El microprocesador puede ser considerado como un dispositivo de manipulación de datos confiable, flexible, simple, pequeño y relativamente barato. Actualmente forma parte importante de indicadores, registradores de gráfica circular y de rollo, controladores, módulos de alarma, instrumentación analítica y en general de todo tipo de aparatos para la medición y el control de variables y parámetros de la industria.

El microprocesador, por otro lado, permite la inclusión de funciones como PID, linealización, computación, adquisición, almacenamiento, procesamiento y transferencia de datos; multiplexión, interfase con otros dispositivos, rutinas de autocalibración y diagnóstico, entre otras esenciales. Todo esto en base al *Software*, que no es sino la forma de transmitir la inteligencia humana al equipo, valiéndose de diversos métodos o estrategias para ello: configurable, cuando no se requieren de conocimientos de algún tipo de lenguaje de computadora para moldear la forma en la que el equipo controlará al proceso; y programable, cuando lo configurable no es suficiente, se hace uso de algún lenguaje de programación avanzada para lograr estrategias mucho muy complejas de control automático continuo y/o secuencial y supervisorio, ayudando a disminuir apreciablemente el tiempo y costo de instalación y puesta en marcha. Además el desarrollo de la tecnología de integración en gran escala, la evolución de las telecomunicaciones y las técnicas de despliegue y procesamiento de datos, han conducido a una revisión mayor en el diseño de los sistemas de control; con lo que es posible distribuir dispositivos inteligentes alrededor de dichos sistemas en una manera sistemática y económica, con intercomunicación entre estos dispositivos para proveer facilidades en el control coordinado y supervisión del operador de la planta.

Se puede alcanzar un alto grado de integridad del sistema, asegurando que cada módulo de control distribuido maneje sólo una pequeña parte de la tarea de control total, con la correspondiente disminución en las consecuencias de falla de cualquier dispositivo.

La interconexión entre dispositivos conforma lo que se conoce como canal de comunicaciones o pista de datos o red de comunicaciones distribuida, y aumenta considerablemente la funcionalidad de los sistemas de control distribuido al conducir información entre nodos o subsistemas que pueden ser de control (controladores), de operación (interfase entre el operador y el proceso), de adquisición de datos, de procesamiento de datos, de interfase con otros dispositivos como computadoras, etc... todo esto a velocidades impresionantes (varios cientos de bauds -bits/segundo-) y entre distancias considerables de varios kilómetros .

De esta forma, el sistema de control distribuido moderno puede ser considerado como un sistema de multiprocesamiento digital, en el cual se interconectan un determinado número de microprocesadores con cierto grado de inteligencia artificial para manipular uno o varios procesos en forma independiente pero interrelacionados uno con otro, integrando así, grandes cantidades de datos generados en un complejo industrial pero con la confiabilidad que ofrecen los esquemas de redundancia y seguridad del Sistema y la oportunidad de dejar atrás la obsolescencia al integrar tecnologías de arquitectura abierta y flexible a los constantes cambios que en este campo se generan hoy en día.

4.3 Sistemas de Control Distribuido

Considero interesante comenzar este capítulo utilizando dos definiciones clásicas de sistemas:

"La interdependencia de las variables en un sistema es una de las inducciones más amplias a partir de la experiencia que se posee."

"Un sistema y la interdependencia de sus partes son ideas intercambiables"

A partir de estas definiciones, empezaré por definir los componentes de un sistema de control y analizar luego en profundidad la interacción entre ellos. Sin perder de vista que el presente desarrollo tecnológico nos obliga a considerarlos, en cuanto a su evaluación, ya no sólo como cibernéticos, sino en un estado superior, que los clasifica como "sistemas abiertos" por su capacidad de realizar ciertas funciones de inteligencia artificial, así como asimilar tecnologías nuevas, manteniendo la compatibilidad necesaria para evitar la obsolescencia.

En el proceso de identificación de la organización de un sistema, se debe determinar en primer término los componentes lógicos del mismo. Después se procede a analizar la naturaleza de la interdependencia entre ellos y

dentro de cada uno de ellos, y los vínculos que motivan el diseño, para comprender las metas perseguidas por el sistema.

Visto bajo esta óptica, es posible determinar como conjuntos principales de un sistema a la colección de actividades incluidas en el control de las variables de proceso, la operación de las unidades involucradas, la informática de la planta y las comunicaciones que permiten la interacción entre estas partes y el sistema en su conjunto con elementos que pertenezcan al entorno exterior, sean éstos elementos simples o sistemas completos.

A su vez, cada una de las partes lógicas que componen un sistema de control, admite una serie de particiones conceptuales. Por ejemplo, en el conjunto control se pueden separar en grupos las tareas relacionadas con el control continuo, discreto y secuencial, así como también clasificar a éste según sea una función regulatoria o de optimización.

Desde el punto de vista de la operación, también son válidas una variedad de particiones, como el caso de la definición de accesos a ciertas áreas específicas asignadas a la supervisión de un grupo determinado de operadores.

De la misma forma se pueden separar las jerarquías de mando, tratando de que el sistema, desde éste lugar, sea percibido como la estructura de la organización que la planta requiera, definiéndose de esta manera sitios de operación por áreas y sitios de operación centralizada.

Existe asimismo y en forma superpuesta a las particiones anteriores, un conjunto de otras separaciones, tanto funcionales como temporales, relacionadas directamente con la operación de la planta. Tal es el caso de la información presentada al operador de forma instantánea y de forma histórica, conjuntamente con el tratamiento diferenciado de las variables, de tal forma que se pueden atender éstas por excepción, o sea mediante tratamientos del tipo alarmas, eventos, mensajes.

Desde el punto de vista de la informática de la planta, también se pueden manejar particiones para el procesamiento de datos y variables en regionales y centralizados, según lo requiera la organización de la planta. Asimismo, es necesario determinar como se debe procesar la información histórica del proceso. Es necesario separar la información en categorías de proceso, alarmas, eventos, control estadístico, totalizaciones, para generar balances y reportes, exploraciones de archivos para extraer conclusiones de operación y/o análisis de costos, etc...

Estos tres grandes grupos (control, operación e informática) que conforman, desde lo funcional, el contenido de un sistema, deben actuar en forma cooperativa y balanceada para lograr los objetivos definidos en base a esta potencialidad. Esto da lugar a que las posibilidades en cuanto a las comunicaciones de un sistema se transformen en un dato esencial.

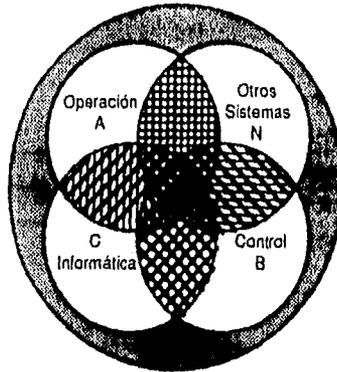


FIGURA 39.- CONJUNTOS PRINCIPALES DE UN SISTEMA

(Tomado de referencia 31)

La estructura de las comunicaciones dentro de un sistema de información y control, permite la interacción entre partes, de allí que su análisis sea fundamental, puesto que la eficiencia de un sistema depende en gran medida de su grado de desarrollo.

Analizando la estructura de comunicaciones como un conjunto, también se pueden hacer particiones de diferente índole. Se puede hablar de redes de comunicación entre las partes de un sistema, redes internas de cada parte del sistema y redes de comunicación con dispositivos remotos del sistema y externos al sistema.

A partir de todos estos conceptos fundamentales en sistemas de control, ahora se puede hacer un análisis dentro de un ambiente diferente, en el cual actuarán los mismos elementos, pero bajo una concepción distribuida.

Respecto de un sistema de control distribuido, es difícil ofrecer una definición que abarque el tema en toda la dimensión. Sin embargo, podríamos decir que "un sistema de control es distribuido en la medida que sus elementos componentes se parten en unidades de procesamiento bien definidas, las que, ubicadas en sitios lógicos, se vinculan entre sí mediante un acuerdo de protocolos".

Queda ahora por extender el concepto de "sitio lógico", puesto que no expresa de ninguna manera una ubicación física, sino más bien "un lugar conceptual" en la estructura del sistema en el que existen particiones bien definidas de procesamiento, datos y control, de tal suerte que la ubicación física carece de sentido.

Es posible caracterizar un sistema de control distribuido considerando ciertos rasgos comunes a todos ellos, tales como:

- Poseer múltiples unidades de procesamiento
- Dar una idea de sistema único
- Disponer de un sistema avanzado de almacenamiento y manejo de datos
- Disponer de un sistema de comunicaciones bien desarrollado
- Tener un alto grado de interacción entre particiones
- Ofrecer más alternativas de diseño

En otras palabras, en un sistema se dispondrá de una serie de particiones lógicas, también denominadas nodos o subsistemas, que, cumpliendo una

función autónoma, cooperan, mediante la interacción con otros nodos, en la obtención del objetivo global del sistema.

4.3.1 Imagen de Sistema Unico

Comenzaré por discutir el significado de poseer múltiples unidades inteligentes de procesamiento. Se definen como compuestas por C.P.U., memoria, soportes funcionales y determinados niveles de software. Es importante aclarar que no basta disponer de estos elementos para afirmar que dos procesadores trabajando para un fin común, por sí mismos, generan dos nodos de un sistema distribuido.

En realidad, tal situación debe ser validada a través de una serie de criterios. Por consiguiente, dos o más procesadores forman nodos en un sistema distribuido cuando los mismos realizan funciones lógicas de igual o parecida significancia y cada uno de ellos, para su objetivo individual, es autónomo y no dependiente del otro.

Por ejemplo, en el caso de un procesador multilazo que en forma autónoma cubre el control regulatorio de un sector de la planta conjuntamente con un procesador que genera una interfase de operación (consola) encargada de la interacción del operador con el proceso, podemos afirmar que ambos procesadores realizan tareas de parecida significancia y debemos aceptar que estamos frente a un sistema de multiprocesamiento distribuido.

No obstante, aún se debe verificar que ambos, en cuanto a su función individual, disponen de un grado importante de autonomía. Si el procesador de control multilazo necesita una gran cantidad de servicios para manejar las variables de proceso, suministrados desde el procesador de la consola, debemos considerar que se dispone de un grado muy elemental de distribución. Lo expresado casi nunca se aplica en lo referente al control regulatorio, pero suele aparecer como una carencia cuando se trata de control avanzado, óptimo o control secuencial.

De esto es posible inferir que a veces podemos encontrarnos con sistemas de procesamiento distribuido para algunas funciones y centralizado o de pobre distribución para otras.

Abundando en el tema, se puede tomar el caso de los elementos de adquisición masiva de datos de planta, imprescindibles en todo sistema de control. Todos ellos disponen de un procesador, pero el grado de significancia funcional les confiere características de nodo autónomo del sistema, o, por el contrario, se pueden considerar como periféricos de algún otro procesador.

En la medida que un elemento de adquisición masiva no solo envía variables al sistema, sino que adicionalmente las procesa en rango, unidades de ingeniería, calcula sus alarmas, las linealiza si se requiere, archiva una parte de su historia, trata ciertas funciones estadísticas, etc., el procesador a cargo de esta tarea pasa a ser un nodo autónomo del sistema.

Por el contrario, en el caso de que se limitase al solo ingreso, validación y emisión de variables, su grado de dependencia es alto, y nos encontramos mucho más próximos a la imagen de un periférico de otro procesador donde se efectúan las tareas antes enumeradas.

Finalmente, sobre este concepto también vale pensar que en tanto y en cuanto las comunicaciones entre nodos no permiten una gran interacción, la concreción del objetivo conjunto se ve amenazada por tal limitación, cayendo en el caso opuesto de entes descentralizados sin cooperación mutua. Dentro de esta idea caben muchas alternativas, dado que no es suficiente con decir que las comunicaciones existen, sino que también cuentan con un marco de disponibilidad muy alto y con la suficiente apertura como para incorporar sistemas exteriores al de referencia.

4.3.2. Multiprocesamiento en sistemas distribuidos

Lo que se trata de establecer en este caso es una característica global, lo que implica el grado en el que un sistema es percibido como único a la población de nodos usuarios "en línea" del mismo, tanto en los aspectos operativos como en los relacionados con su configuración y/o programación. Este concepto establece que los usuarios del sistema, individuos y/o programas, pueden desconocer (no tener en cuenta) la existencia de unidades de procesamiento múltiple.

La percepción que se ha de obtener es la sensación de que las acciones ocurren en el nodo donde esté situado el observador, cuando en la realidad pueden estar ocurriendo en otro nodo con el que se interactúa a través del sistema de comunicaciones.

Los elementos básicos cuya existencia determina la imagen del sistema único, son la transparencia y la interdependencia.

La transparencia implica en el extremo que un usuario localizado en un nodo utiliza todos los recursos del sistema, residan ellos allí o no, como si efectivamente fuesen de su propiedad y empleando los mismos comandos de operación, acceso, configuración y programación.

Por ejemplo, en el caso de disponer de una transparencia total, se podría ejecutar un programa o una rutina funcional en cualquiera de los nodos del sistema, o bien un nodo usuario accedería o emitiría un dato de la misma forma desde cualquiera de ellos.

En la medida que se consigue hacer invisible la multiplicidad de nodos, se obtiene una gran simplicidad de configuración y/o programación con una importante capacidad de reconfiguración y un alto grado de transportabilidad de software. Ello se ejecuta con independencia del medio físico, incorporando como caso general "la máquina de software".

También se simplifica el repertorio de software en la medida que no se requieren dos soportes operativos o de lenguaje diferentes para la tarea a ser

desarrollada en distintos nodos. Por esa misma razón se reduce el número de configuradores, compiladores, editores, etc.

Se facilita en gran medida el crecimiento del sistema y se amplían las posibilidades de utilización de las nuevas rutinas (máquinas virtuales) en la medida que las mismas puedan correr en cualquiera de los nodos. De allí que ante un nuevo desarrollo de software, éste estará disponible automáticamente para todos los componentes del sistema. La transparencia también permite balancear la carga del sistema al posibilitar el traslado de tareas a nodos menos comprometidos con el tiempo, siempre y cuando no se violen reglas importantes de autonomía.

Como ejemplo y volviendo al caso del procesador multilazo, si es posible disponer en él de transparencia operativa, podrán asignársele diferentes funciones. Es decir que será posible que actúe como controlador regulatorio utilizando técnicas de configuración por medio de estructuras pre-programadas (técnicas de bloques), como computador de procesos mediante el empleo de lenguaje de programación de alto nivel, como controlador de procesos discontinuos basado en un lenguaje secuencial, o, finalmente, como una combinación de todos estos elementos actuando simultáneamente. La transparencia puede ser homogénea o heterogénea, dependiendo de un número de factores: homogénea con los nodos del mismo sistema conteniendo un alto grado de similitud tanto en hardware como en software, haciéndolos fácilmente interconectables; y heterogénea cuando implica la utilización de interfases entre hardware y software disímil. En cualquiera de los casos, se desarrollan mecanismos de software que permiten, en virtud principalmente de las conversiones de códigos y la sincronización de ejecución, obtener una percepción de transparencia.

En definitiva, un sistema debe presentar una imagen de sistema único ya que habrá de suministrar finalmente una mayor administración de planta, evitando costos de incoherencias y permitiendo que el sistema adquiera la "forma" que cada usuario determina en función de su estilo de organización.

4.3.3. Grado de distribución

El proceso de distribución involucra la dispersión de componentes tanto de hardware como de software, o sea que desde el hardware se distribuirán diferentes CPU's, memorias, interfases, etc. También existirán lugares de residencia para los datos en forma de colección de registros, otros objetos informáticos y operadores de software del sistema. Los programas y configuraciones operativas también son objeto del fenómeno de dispersión. A la par, los sistemas operativos que apoyan las diferentes tareas de cada nodo también deben ser distribuidos.

En la medida que es completa la distribución de los elementos mencionados, se logra un grado de "distribución" mayor y se disfruta de la mayor cantidad de beneficios que aporta la solución distribuida a una problemática particular.

En función de cómo se dispersen los datos, los procesamientos y el control de funcionamiento del sistema, se originarán distintas topologías, generándose estructuras del tipo estrella, del tipo anillo o del tipo bus, siendo estas dos últimas las "formas" estructurales más comunes en un sistema de control distribuido.

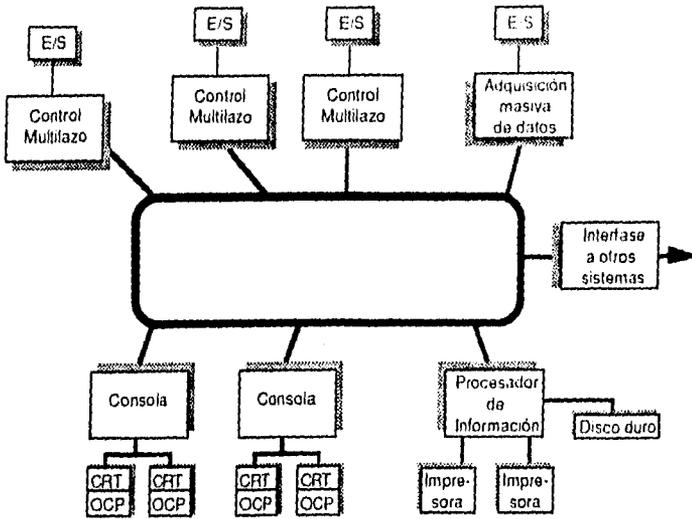


FIGURA 40.- SISTEMA DE CONTROL CON ESTRUCTURA TIPO ANILLO
(Tomado de ref. 31)

La forma de un sistema en cuanto a la interconexión física explica solo la manera en que tienen lugar las comunicaciones a través del medio físico.

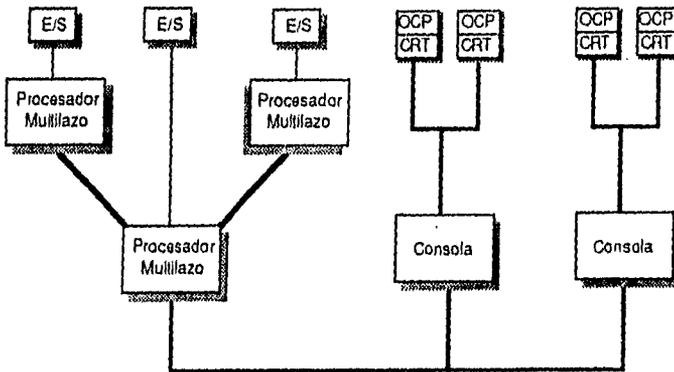


FIGURA 41.- SISTEMA DE CONTROL CON ESTRUCTURA TIPO "BUS" O LINEAL
(Tomado de ref. 31)

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

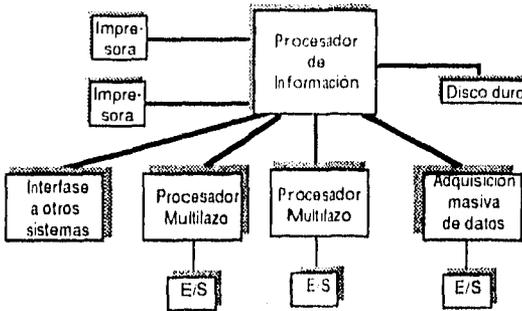


FIGURA 42.- SISTEMA DE CONTROL CON ESTRUCTURA TIPO ESTRELLA
(Tomado de ref. 31)

A fin de extender el concepto, cabe señalar que hay tres características básicas que determinan la distribución de un nodo: los niveles de software residentes en cada nodo, las posibilidades de operación autónoma de cada nodo y, por último, en que medida cada nodo puede ser intrínsecamente de propósitos generales.

Básicamente, todo procesador inteligente asignado a una tarea, dispone de una colección de niveles de software que operan sobre un soporte físico. se puede decir entonces que la organización más elemental de un procesador consiste de hardware, sistema operativo, programas de aplicación y datos.

En general, un procesador en un ambiente de multiprogramación puede desarrollar simultáneamente varias tareas; cuando se intenta una solución distribuida, se busca distribuir toda esta actividad en una red de multiprocesamiento, respetando los conceptos establecidos anteriormente. Esta tarza de separación implica, para efectos de no perder la imagen de sistema único, la aparición necesaria de un desarrollo avanzado en cuanto al manejo de datos y las comunicaciones tanto hacia adentro como hacia afuera del sistema. En la medida que estos elementos sean potentes, mayor será el grado de distribución alcanzable.

4.3.4. Organización de los datos

La evolución de los sistemas ha convertido a la base de datos en un núcleo importante y los arreglos de datos junto con los métodos de acceso determinan cuán adecuado es un sistema para cubrir los requisitos de cada aplicación.

La arquitectura de los sistemas distribuidos incluye las particiones de inteligencia, de funcionalidad y de riesgo dentro de un contexto de disposición geográfica importante. Los elementos funcionales o nodos, tal cual lo establecido, interactúan en virtud de una red de comunicaciones y de acuerdo a criterios de funcionalidad, rendimiento, confiabilidad, seguridad, etc.

Por ejemplo, en el caso de un nodo asignado para ejercer funciones de control, la información necesaria para acceder a las variables de proceso y efectuar las funciones de control debería residir en dicho nodo; por el contrario, si se tratase de coleccionar información histórica para efectuar análisis particulares de un determinado usuario, un nuevo nodo podrá ser lógicamente asignado a esta tarea y la información pertinente deberá pertenecer a su propio segmento de la base de datos.

Si bien en el pasado fué técnica común mantener los datos residentes en una locación centralizada, los problemas de competencia creados por los múltiples usuarios (nodos) que pretenden acceder a la misma información, junto con la necesidad de ubicar los datos tan cercanos como sea posible a los usuarios de los mismos según un criterio de prioridad, la búsqueda de reducir duplicaciones innecesarias de información, la demanda de una respuesta más efectiva, confiable y económica, han determinado la utilidad de una base de datos distribuida.

Obviamente, el hecho de distribuir una base de datos no debe implicar una merma operativa, es decir que se debería disponer de las mismas prestaciones que en el caso de una base de datos centralizada.

Los datos han de distribuirse de una forma tal que se los independice de su ubicación física o de restricciones de configuración, así cualquier relación entre ellos podrá estar inmediatamente disponible.

Debería ser posible la expansión de datos, tal como agregar o extender registros sin perturbar las aplicaciones existentes, y, aún más importante, sería necesario que la estructura fuese simple de comprender, alterar y usar.

El hecho que la base de datos pueda ser modificada o expandida sin alterar programas o rutinas de aplicación que utilizan la información allí residente, implica crear las condiciones de independencia de datos y, en consecuencia, una mayor simplicidad y transportabilidad de programas, un menor mantenimiento de software, y por ende, una reducción de costos.

Dado que el procesamiento inteligente se realiza en cada nodo y la base de datos, si bien única, está distribuida, a los efectos de respaldar el intercambio de información se hace necesario un mecanismo general para el acceso de información. Este nuevo elemento es el conocido como *Data Base Manager* (DBM).

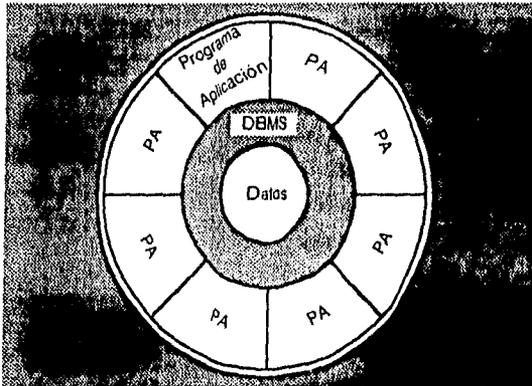


FIGURA 43.- EL ACCESO A LOS DATOS POR PARTE DE LOS PROGRAMAS DE APLICACION SE REALIZA A TRAVES DEL DBMS

El propósito de un DBM es posibilitar la total independencia de los datos respecto de los usuarios (diferentes programas y/o rutinas), permitir mayor facilidad en el uso del sistema, minimizar la duplicación de información, reducir las necesidades de memoria, posibilitar mayor versatilidad en la representación de relaciones entre datos y asegurar un alto grado de seguridad e integridad de los datos por intermedio de la autorización y control de acceso a la base de datos.

En definitiva, los usuarios de los datos son esencialmente programas de aplicación, también denominados, en función de sus características de máquina virtual, "application processors", del tipo de bloques de software para control continuo, programas de control secuencial, o bien, programas generadores de páginas de consola.

Un DBM debe obtener la información para el usuario independientemente del lugar donde se halla almacenada, lo que, finalmente, es el significado de independencia de datos.

Por otra parte los datos distribuidos suelen tener diferentes características, pudiendo ser constantes, dinámicos, históricos o combinaciones de ellos. Muchos datos deben ser actualizados periódicamente en condiciones de tiempo real, otros son sólo necesarios por demanda de operadores o ingenieros de proceso.

El factor seguridad asume una importancia vital para garantizar la confiabilidad del sistema.

En el manejo de datos, la seguridad significa su protección contra la destrucción o la modificación por fuentes no autorizadas.

Es función de DBM proveer recursos para generar protecciones de acceso, de manera tal que sólo usuarios identificados les será permitido el acceso o la alteración de la información. Otros aspectos de seguridad importantes son la integridad de los datos y la verificación del acceso a la escritura de un dato, es decir que hay una serie de condiciones que deben ser verificadas por el

DBM antes de que un dato o un segmento de información pueda ser modificado.

Por ejemplo, si un operador, desde una terminal ubicada en un nodo, pretende modificar el valor deseado de una rutina de control que se encuentra activa en otro nodo, el DBM, al recibir tal solicitud, debe verificar si no hay ya otro operador realizando la misma operación y, si esto ocurre, cual de los dos operadores tiene mayor prioridad.

Dentro de una arquitectura distribuida, el DBM reside en cada nodo y se comunica con la red para efecto de conseguir la información deseada. Existen diferentes niveles de software a través de los cuales deben pasar un reclamo de información, estos son los "procesadores": externo, lógico y físico.

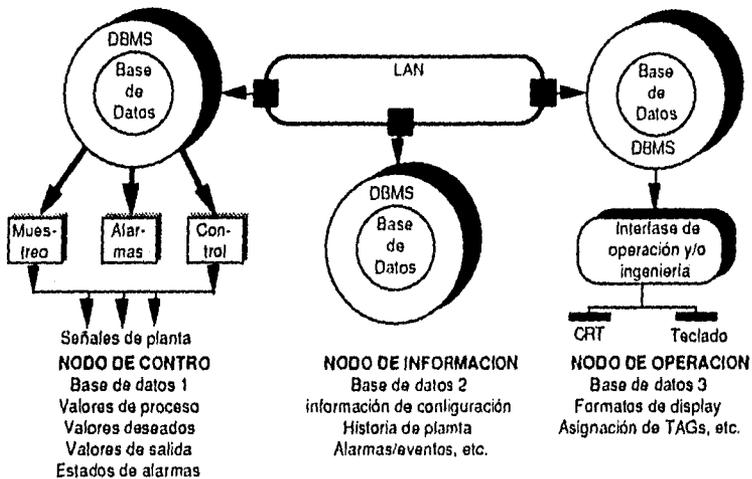


FIGURA 44.- SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO - En un sistema distribuido, tanto los datos como el DBMS se encuentran distribuidos en nodos funcionales vinculados mediante un LAN

El procesador de observación externo recibe y verifica el código mediante el cual un determinado programa de aplicación solicita un dato. Si, por algún

motivo, tal reclamo es rechazado, se envía un mensaje de error al programa solicitante y la transacción se considera terminada.

En el caso de que la solicitud sea considerada válida por procesador de observación externo, éste envía al programa originador de información un mensaje de aceptación a la vez que transfiere la solicitud al procesador de observación lógico. En este nivel es donde se conoce en que lugar del sistema reside la información buscada. Si la misma reside en otro nodo del sistema, la solicitud será transferida al procesador de observación lógico de este nuevo elemento. Por el contrario, si la información es residente en el primer nodo, la solicitud se transfiere al procesador de observación físico, quien efectivamente obtiene el dato de la memoria; a partir de allí se revierte el sentido de transferencia entre niveles, hasta que el dato finalmente alcanza el programa de aplicación originador de la solicitud de información.

En el caso que, ante una solicitud, el procesador de observación lógico desconociera la ubicación del dato requerido, éste comienza una búsqueda a través de los nodos del sistema hasta ubicar el lugar preciso de residencia. Esta locación es entonces almacenada en tablas para facilitar búsquedas futuras, minimizando el tiempo necesario para la obtención de información.

Este procedimiento significa que el operador se libera de la necesidad de conocer la residencia de los datos en el sistema.

El DBM es uno de los elementos necesarios para que cada usuario "tenga la sensación" de que las acciones acontecen en su nodo de observación.

Para resumir, el DBM, en forma automática, obtiene (get) y coloca (put) información en el sistema, operando bajo un principio de preferencias para la ubicación de los datos en los diferentes nodos.

Las preferencias se determinan generalmente por una serie de condicionamientos. Estos son en principio geográficos, luego de frecuencia de uso y sincronización, y después, en función de la afectación en cuanto a la "carga" del sistema de comunicaciones y se sigue en la evaluación de la

"carga" de procesamiento del nodo en particular, todo dentro de un cuadro de seguridad.

Para efecto de obtener rápidamente la información, el DBM mantiene en cada nodo réplicas de las tablas con los índices de residencia de la información. Es válido decir que estas tablas son dinámicas y se actualizan constantemente. Por ejemplo, en el caso de no tener registrada la dirección de una variable de terminada, mediante un proceso de búsqueda la ubica e incorpora el lugar de residencia en la tabla índice para permitir el acceso rápido a la misma la próxima vez que le sea solicitada.

De la misma manera, si el lugar de residencia se modifica por la decisión de algún usuario, cuando el DBM intenta obtener el dato basado en su índice, recibirá un mensaje de error como respuesta a su solicitud. Ante este evento procederá a efectuar una nueva rutina de búsqueda al cabo de la cual actualizará la tabla índice.

Existen varios esquemas de acceso; entre los más rápidos se puede mencionar el método de "transacción basada en una lista predefinida" y el de "ítems múltiples de datos". Este último permite que en una sola transacción se consigan múltiples elementos de información.

En lo que hace al primer método, lo utilizará cada vez que necesite obtener ese grupo predefinido de datos. Por ejemplo, cuando un "display" en una consola presenta una serie de variables, el conjunto de las mismas puede ser definido en una lista; a partir de allí, cada vez que la información necesite ser actualizada, el DBM invoca directamente a la mencionada lista sin detenerse a especificar todos los ítems que la componen. Dichas listas son distribuidas y autorizadas por el DBM.

Creo importante aclarar que no todos los sistemas disponen de un manejo de datos como el explicado. Se tomó el desarrollo más completo para efectos de extender el concepto al máximo de sus posibilidades. En la medida en que la estructura de manejo de información sea más completa, mayor será la autonomía de la potencialidad y el grado de distribución del sistema.

4.3.5 Comunicaciones

Tal cual fue ya expresado, el desarrollo de la estructura de comunicaciones conjuntamente con el desarrollo de la estructura de manejo de datos, caracterizan la potencialidad de un sistema de control distribuido. Por lo tanto, trataremos ahora las comunicaciones en los sistemas de la misma forma que se analizó la distribución y manejo de datos.

El rol de las comunicaciones ha crecido en forma sostenida en la implementación de sistemas de control distribuido. Definiendo las comunicaciones como la tarea de transmitir datos, su objetivo consiste en unir el sistema conformado por un grupo de nodos más o menos autónomos.

El sistema de comunicaciones debe ser obviamente eficiente y posibilitar la transmisión y/o recepción de datos desde y hacia cualquier lugar en el sistema y aún extender tal capacidad de intercambio a elementos exteriores al mismo.

Los recorridos de comunicación, por su parte, deberán ser estructurados de manera tal que se aleje el peligro de saturación de las rutas de datos principales.

Es posible determinar diferentes alternativas de comunicación. Por ejemplo, se puede tomar una serie de procesadores multilazo y consolas interactuando sobre una ruta de datos a la que se le define genéricamente como LAN (*Local Area Network*), o bien es posible evolucionar y crear una serie de LAN's secundarios que permitan un alto grado de Intercambio local, descargando de tal responsabilidad al LAN principal y atejando la posibilidad de saturación de las vías de comunicación. Uno de los objetivos principales de toda estructura de comunicaciones es mantener la sincronización operativa con el tiempo real.

Las necesidades de comunicación pueden separarse en una serie de conjuntos. El primero de ellos representa el nivel de campo, encima de éste

está el nivel de comunicaciones entre elementos pertenecientes a un nodo, luego el nivel correspondiente a las comunicaciones entre nodos y finalmente, las comunicaciones a nivel administrativo general e ingeniería de planta.

Para cada uno de estos grupos es necesario dar una respuesta. Por ejemplo, a nivel de campo, las comunicaciones se realizan mediante esquemas físicos o mediante comunicaciones digitales en el caso de equipos de campo inteligentes (analizadores, transmisores inteligentes, etc.) Ascendiendo en la estructura, lo ideal sería disponer de LAN's locales que permitan la interacción entre procesadores actuantes (nodos) a este nivel para no afectar las vías mayores de comunicación. A nivel de sistema, una estructura de comunicaciones principal deberá unificar la interacción entre nodos distribuidos, mientras que a nivel de planta debería ser posible coleccionar los LAN's de los diferentes sistemas en un LAN superior.

Es importante destacar que las comunicaciones deberán permitir el desarrollo de toda la capacidad tanto en una aproximación desde la base hacia la cima como recíprocamente desde el tope hasta la base.

Existe una intensa búsqueda para la estandarización de las estructuras de comunicación, de ahí que también exista la necesidad de estructurar y ordenar los esquemas de manejo de las comunicaciones.

Algo que se ha hecho (en algunos casos ya se ha implementado) fué diseñar la estructura de comunicaciones siguiendo una división funcional organizada de niveles, de forma tal que a cada nivel le sea asignada una función precisa. Cada nivel entonces puede ser diseñado separadamente y es relativamente independiente del resto. Estos niveles fundamentales están dispuestos en una estructura que sigue un orden de jerarquía lógica y se los integra como un conjunto que tiene por objetivo suministrar servicios de comunicación fácilmente comprensible y ordenada. Por ejemplo, el modelo arquitectónico propuesto por la ISO (*International Standard Organization*) para la interconexión de sistemas abiertos OSI (*Open System Interconnection*). Este modelo ha ganado muchos adeptos en la industria y se

le toma como base en el desarrollo de comunicaciones entre aparatos inteligentes operando en un ambiente distribuido.

Este modelo consiste de siete niveles; cada uno de ellos suministra un conjunto de servicios, proporcionando un alto grado de uniformidad en el diseño de las comunicaciones que facilita el intercambio. Esto permite la modificación y/o el cambio dentro de un determinado nivel sin afectar los otros. De esta forma se logra la adaptación a la evolución tecnológica y a las características particulares que impondrá el adherirse a las normas sobre comunicaciones que están en proceso de elaboración.

Cada nivel utiliza los servicios del que está por debajo del y a su vez, sirve al que se encuentra por encima. El propósito de cada nivel a grandes rasgos, es el siguiente:

4.3.5.1 Nivel de aplicación

De manera breve, los protocolos de este nivel se ocupan de suministrar la información distribuida que un determinado programa de aplicación y sus recursos de sistema operativo necesitan.

4.3.5.2 Nivel de presentación

Suministra los recursos para representar información y datos a los usuarios preservando el significado, a la vez que resuelve las diferencias de síntesis. Los servicios típicos de este nivel implican la conversión de códigos y la configuración o inscripción de datos.

4.3.5.3 Nivel de sesión

Suministra los medios para la interacción entre diferentes programas de aplicación.

4.3.5.4 Nivel de transporte

Permite la transferencia transparente de datos entre programas de aplicación. Es responsable de la integridad de datos y la recuperación de errores, se encarga del reconocimiento de mensajes e identifica y descarta mensajes duplicados. También maneja la retransmisión de mensajes.

4.3.5.5 Nivel de red

Es responsable por el mantenimiento físico de los mensajes definiendo fuentes y destino de los mismos. También control el tiempo permitido para el envío de un mensaje evitando la existencia de mensajes "flotando" en la red. Este nivel se encarga asimismo de notificar a la tabla de población cuando un determinado elemento no puede ser accedido.

4.3.5.6 Nivel de eslabonamiento de datos

Posibilita la transmisión de información a través del medio físico, realizando a su vez las verificaciones pertinentes.

4.3.5.7 Nivel físico

Suministra los medios funcionales mecánicos y eléctricos para una transmisión transparente sobre el medio físico.

Utilizando este modelo, la IEEE ha trabajado en la confección de normas; por ejemplo, para los niveles 1 y 2 (físico y eslabonamiento de datos) se establecieron una serie de normas agrupadas bajo la denominación IEEE 802. Dado que los LAN's son identificados generalmente por su topología y método de acceso, la idea de estandarización es importante.

Las topologías más comunes en redes son del tipo estrella, "bus" (lineal) y anillo. En la estructura de tipo estrella, las comunicaciones se establecen y son controladas por una unidad central, conocida como "director de tráfico",

que dirige las comunicaciones legislando en los conflictos entre nodos. Las comunicaciones se establecen por múltiples líneas que unen punto a punto con el "director de tráfico".

La estructura de tipo "bus" consiste de un único medio físico bidireccional con los nodos conectados a él. Por su parte, la estructura de anillo dispone también de un único medio físico, solo que la información fluye en un solo sentido y cada nodo actúa como un repetidor. Tanto la estructura de "bus" como la de anillo permite implementar sistemas de comunicación que, en su fase más avanzada, evitan el uso de directores de tráfico, siendo conocidas como *masterless token passing*.

La disponibilidad del *token*, una especie de comando de la red, permite que el nodo transmita mientras los demás escuchan. De esta forma, por el hecho de circular el *token* entre los distintos nodos, se evitan problemas de colisión de información. Por lo general existe una rutina de arranque de comunicaciones por la cual se identifican los nodos activos; una vez finalizada la misma, se comienza con la operación normal que implica la mencionada circulación del *token*, haciendo que cada nodo se comporte como "maestro" una vez por cada ciclo.

En el caso de falla de alguno de los nodos, se identifican nuevamente los componentes que ahora están activos con una rutina de restablecimiento. De esta manera el nodo bajo falla queda aislado de la población de usuarios y el mecanismo de comunicaciones continuará su operación normal entre el resto de los nodos.

4.3.6 Beneficios Generales de un Sistema de Control Distribuido

- Los desplegados de grupo proveen una manera de ver una combinación de lazos de control que tienen un significado en términos de asociaciones de proceso.
- La confianza del operador aumenta al leer un valor de una variable en lugar de inferirlo de la posición de un indicador entre dos divisiones de una escala.
- El "barrido" y los datos calculados pueden ser trazados en tiempo real simulando las gráficas de rollo hasta el límite máximo aceptado en una pantalla. Se gana adicionalmente la habilidad de re-configurar este número y arreglo sin perder la información de dichos datos.
- Los datos pueden ser "salvados" históricamente en una variedad de formatos hoy en día (por ej., cada hora, día, mes, etc.) para usarse en tareas externas hechas en computadoras personales.
- Las variables de cada unidad tales como condiciones de alarma, estado, urgencia, etc. son vigiladas en desplegados de operación o control.
- Los desplegados que emulan a los diagramas de flujo de proceso son creados para igualar la numeración de la instrumentación de la planta, su ubicación y condiciones actuales para una amplia variedad de instrumentos y cálculos existentes.
- Los lazos de control pueden ser reactivados desde manual a automático y todos los lazos que se acostumbraban tener en cascada pueden ser fácilmente reconectados.

CAPITULO 5.

NUEVAS TENDENCIAS DEL CONTROL DE PROCESOS.

Con la utilización del Sistema de Control Distribuido y la Computadora (del microprocesador) en el control de procesos, actualmente se aplican de manera práctica tecnologías que habían permanecido en el papel desde su desarrollo en los años 60's. Algunas de estas tecnologías, como el control multivariable y la optimización, los sistemas expertos con lógica difusa y sistemas neurálgicos, el fieldbus, etc...son hoy en día el modo más efectivo de aumentar la rentabilidad de los negocios, reduciendo los costos de fabricación y aumentando la productividad; algunas de estas tecnologías se mencionarán a continuación de manera breve.

5.1 Sistemas Expertos

Serán los 90's la década de los Sistemas Expertos? Los 80's seguramente serán recordados como la década del microprocesador en el control de procesos. Muy pocos proyectos de control hoy en día son especificados sin que incluyan sistemas de control distribuido, controladores lógicos programables y algunos transmisores inteligentes: Así que lo más probable es que los años 90's en el año 2000, serán recordados como la década de los Sistemas Expertos.

Realmente se requieren sistemas expertos? En un ejemplo cotidiano se puede contestar a la pregunta anterior: seguramente la mayoría de nosotros hemos pagado hipotecas o tarjetas de crédito religiosamente durante varios años, y el día que, por alguna razón nos atrasamos en el pago de UNA mensualidad, rápidamente, una carta generada por computadora muy poco cortés, aparece en el correo, recordándonos de nuestra inadecuada conducta como cliente. La reacción como usuario es: "Que esta gente no sabe que he pagado puntualmente por diez años?."

Si se estuviera usando un sistema experto, la computadora podría revisar el registro de crédito almacenado y tomar una decisión en la manera de responder. De esta manera, una carta personalizada sería generada felicitándonos por los pagos a tiempo durante la década pasada y extendiendo un recordatorio AMISTOSO de que la fecha límite de pago ha expirado. No sería nuestra reacción mucho más favorable?.

Los Sistemas Expertos son una ramificación de la ciencia de inteligencia artificial. Un sistema experto está pensado para duplicar, a través de "software de computadora", la lógica en la toma de decisiones de un 'experto'.

El concepto es simple: cualquiera que haya utilizado los comandos 'SI...ENTONCES' en un programa de computadora, ha utilizado el principio básico de un sistema experto. El resultado es similar al diagrama de flujo utilizado para diagnosticar y reparar automóviles.

El problema con el enfoque de los sistemas expertos (y eso que existen sistemas expertos programados en el lenguaje más simple: BASIC) es que para modificar la lógica es necesario re-escribir el código de la computadora. Los sistemas expertos de hoy en día manejan la lógica como datos. De esta manera, usando un programa base de sistema experto, la lógica puede modificarse en forma de datos declarados.

La complejidad puede crecer enormemente a partir de un programa básico. Algunos programas sofisticados estarán disponibles que incluyan modelos matemáticos para unidades de proceso y equipo, y rutinas que permitan a dichos programas modificarse a sí mismos o, en otras palabras, "aprender". ?

Los sistemas expertos pueden resolver muchos de los problemas de control con los que la industria se enfrentará en los años noventa. Una de las principales interrogantes que se genera, tanto con los

sistemas de procesamiento computarizado en las industrias de proceso, como con los sistemas integrados de manufactura en las industrias discretas, es y será ¿Qué hacer con todos los datos generados por esas computadoras?. Un sistema experto se convierte en solución natural para seleccionar cuales datos son importantes, adónde necesitan ir esos datos y qué tan seguido se requiere tenerlos ahí.

La seguridad es otro problema que requerirá de una mejor solución en los 90's. Aquí otra vez, los sistemas expertos pueden, y están de hecho siendo utilizados, para proveer consejo para enfrentar situaciones de peligro.

Un mejor control es otro beneficio del sistema experto. Puestas en marcha y paros, son fácilmente manejados. El control avanzado y optimización pueden ser mejorados por esta tecnología tan poderosa. Los operadores prefieren este tipo de aplicaciones al uso de algoritmos complejos, debido a que los consejos se dan en sus idiomas de origen. Los consejos cuestionables pueden ser revisados para descubrir la lógica que originó la decisión.

El siguiente es un ejemplo de una regla de captura de datos para una columna fraccionadora mostrada en formato "SI...ENTONCES", y con el mensaje resultante para el operador.

SI

La relación RI de carga a la recirculación (variable calculada) es mayor que 1.2

y

el analizador de tolueno A70-TOL es menor que 200 ppm

y

TR-25 es mayor que los 250° F

ENTONCES

Envía "Bajar relación de calor a la carga (Q/F) en 0.5 M BTU/bbl"

al operador

El mensaje para esta regla es presentado al operador como sigue:

DATOS 1) Relación de Carga/Recirculación= 1.3
 2) Ambos productos están dentro de especificación
 3) Analizador de Tolueno A70-TOL= 195 ppm
 4) TR-25= 225° F

POSIBLE PROBLEMA: Calor excesivo a la torre de benceno

OBJETIVO: Ahorrar energía

ACCION: Bajar relación de calor a la carga (Q/F) en 0.5 M BTU/ bbl

Lo mejor en detección de fallas y mantenimiento de los procesos y equipo son otras especificaciones obvias para sistemas expertos.

Lo más interesante es que, el hecho de que se sabe poco y se lee poco sobre el uso de sistemas expertos, no significa que no estén siendo desarrollados y utilizados aún hoy día. Las grandes compañías de procesos están haciendo enormes avances en este campo, solo que no dicen nada. Para revelar los detalles de la instalación de un sistema experto, es necesario revelar los grandes secretos de los procesos propios y de los altamente cotizados expertos. Lo cual significa que no podemos esperar encontrar muchos artículos sobre este tema; cada compañía depende de sí misma a pesar de que haya muchos artículos publicados sobre la historia de sistemas expertos. Solo los expertos de cada proceso pueden decidir lo bien que una planta puede funcionar.

La tecnología de la computadora ha marcado el camino a seguir para la adopción de sistemas expertos. No hace mucho tiempo se necesitaba una computadora especializada y la habilidad de programar en lenguajes avanzados. Hoy, varios paquetes de programas están al alcance para operar en las computadoras más populares. Muchas inclusive pueden manejar funciones de tiempo

real. Los programas de sistemas expertos en computadoras personales de bajo costo, son una buena forma de ganar algo de experiencia con esta tecnología.

5.2 Sensores

Este es sin duda uno de los campos de más desarrollo en la actualidad por ello extenderse en el punto de la situación actual que guarda el mercado de sensores en el mundo, vale la pena porque existen sensores prácticamente para todo, no solo para medir las principales variables de proceso que se han ido mencionando en este trabajo.

Increíblemente, mucha gente pasa a través de un día completo sin siquiera pensar concientemente en los sensores. Sin embargo, los sensores son parte vital de la rutina diaria de muchas sociedades hoy en día y seguramente lo serán en la nuestra. Por ejemplo, nuestros dedos contienen sensores táctiles y nuestros ojos sirven como sensores ópticos. Los automóviles nuevos contienen un grupo de sensores que monitorean y controlan la combustión y las emisiones del motor. Muchas tiendas de autoservicio y almacenes usan sensores para verificar la mercancía. Estos sensores "barren" la etiqueta del producto buscando códigos y responden con el nombre del producto y su precio.

Con esto quiero decir que aún hoy en día, en que las computadoras están al alcance de todos, incluyendo la automatización de procesos industriales, los sensores juegan un papel crítico y se están convirtiendo en un elemento por demás importante para hacer que los procesos, productos y servicios sean más competitivos y costeables.

Pero, qué es un sensor?

Un sensor es cualquier tipo de dispositivo físico que mide algún parámetro de interés y produce una respuesta. Hay sensores para muchas clases de mediciones. Típicamente, los sensores miden apariencia, brillantez, color, composición, lustre, peso, espesor, densidad, tamaño, temperatura, resistencia, presión, flujo y más.

Un sistema sensor puede incluir a el sensor en sí y los circuitos asociados y los componentes necesarios para energizar el sensor, interpretar la señal y comunicarse con el usuario. Estos "sistemas" son a los que nos referimos antes como *transmisores*. Los transmisores incluyen los componentes necesarios para medir un parámetro de interés y transmitir su valor a un registrador, por ejemplo.

De esta manera, las compañías prestadoras de servicios pueden ofrecer soluciones específicas para cada ramo de la industria. Diferentes clientes en industrias tan importantes como pulpa y papel, alimentos y bebidas, petroquímica, energía, etc... acuden con diferentes problemas de medición y control de procesos a resolver.

Por ejemplo, en la industria papelera, la resistencia del producto es un parámetro clave por el cual los papeleros definen la calidad y aceptación de sus clientes. Para asegurar esa calidad y aceptación, se requiere un análisis continuo y en línea de las propiedades de resistencia en toda la hoja de papel. Para hacer esto, actualmente se usan sensores de resistencia a base de ultrasonido.

Asimismo, en otras industria como la petrolera, la industria aeroespacial y la industria eléctrica, los problemas son similares pero de diferente naturaleza. Sus aplicaciones involucran componentes de uso crítico donde la detección de problemas y el mantenimiento de la seguridad son vitales. Por ejemplo, se pueden encontrar sensores que detectan daños, corrosión y fatiga de materiales: imágenes ultrasónicas inspeccionan y prueban componentes críticos para aplicaciones que van desde corrosión por

tensión en plantas eléctricas hasta detección de adelgazamiento en fuselajes de motores con combustible sólido para cohetes espaciales.

Otro ejemplo, en aplicaciones de medición y control de procesos, el uso de transmisores de presión es muy extenso. Se han desarrollado transmisores electrónicos que reemplazan a los sistemas operados neumáticamente. Estos transmisores están basados en sensores que eliminan totalmente las partes móviles entre el primario y el elemento secundario, alargando el tiempo de vida del dispositivo. Además, incluyen tecnología de circuitos integrados micromaquinados que se ajustan dinámicamente con rayos Laser a las condiciones del proceso, dando como resultado una resolución excelente y estabilidad de la medición.

No es sino hasta hace poco que existe una técnica para análisis "en línea" de materiales de alto peso molecular, polarizables y térmicamente sensibles. Un sistema de medición de este tipo, con estas características es de gran interés para la industria de refinación de petróleo crudo. Este sistema combina los beneficios de la cromatografía de gases y líquidos para efectivamente monitorear y controlar el proceso.

5.2.1 Nuevas tendencias.

Como todos sabemos, ni el tiempo ni la tecnología se detienen. Una revolución tecnológica está cambiando significativamente el tamaño, forma, métodos de fabricación y costo de los sensores. Se están produciendo sensores más pequeños, rápidos y más sofisticados que aquellos que encontrábamos solo hace algunos años atrás. Tres tendencias significativas están emergiendo:

- 1) El desarrollo de microsensores y biosensores

- 2) El desarrollo de sensores "inteligentes"
- 3) Avances en sensores electro-ópticos

Los microsensores son un producto de las técnicas de micromaquinación (nacidos del área de la tecnología de microcircuitos de alta densidad). Muy sofisticados y extremadamente pequeños (de 0.05 a 2 milímetros sobre un lado), estos microsensores son usados para medir presión, temperatura, flujo, y para analizar la composición de diversos gases. Su tamaño, respuesta rápida en tiempo, y mejorado funcionamiento presentan varias ventajas sobre los actuales sensores convencionales. Los microsensores pueden ser usados en medición y control de procesos, monitoreo de ambientes, diagnósticos médicos y más.

Mientras tanto, los avances logrados en los microsensores han llevado al desarrollo de una clase de sensores especiales llamados "biosensores". Los biosensores usan pequeñas cantidades de material orgánico, enzimas o anticuerpos los cuales van a reaccionar ante la presencia de otro material. De esta manera son capaces de detectar moléculas sencillas y ser lo suficientemente específicos para discriminar la molécula deseada de las demás. Las aplicaciones de estos sensores pueden variar desde la detección de toxinas en alimentos, contaminantes en suministros de agua hasta identificar elementos extraños en procesos industriales.

No solo se están produciendo sensores más pequeños y más rápidos, sino que se están creando sensores más "inteligentes". Los sensores inteligentes son combinaciones de sensores y microprocesadores. Agregando el microprocesador se logra la corrección de la lectura del sensor. Esto es, el microprocesador analiza datos del sensor y toma decisiones basado en como los datos conforman las reglas programadas dentro de él mismo. El microprocesador se puede usar para corregir lecturas no lineales del sensor o cambios en la temperatura del mismo.

El microprocesador puede también facilitar la comunicación digital entre el sensor y otras partes del sistema. El desarrollo de sensores inteligentes está creando oportunidades de monitorear y controlar procesos industriales más estrechamente conforme más sensores pueden ser entrelazados en un sistema de control de procesos, el cual puede usar sus datos al máximo.

Avances en tecnología Laser y Fibra Optica combinados con técnicas de micromaquinado han abierto las puertas a una clase de microdispositivos electro-ópticos. Extremadamente precisa, específica y rápida, la medición óptica es ventajosa porque no interrumpe o disturba el proceso que esta siendo medido. Es también intrínsecamente seguro y pueda resultar por ello ventajoso en ambientes agresivos y peligrosos. Este nuevo enfoque provee mediciones de presión muy exactas, análisis en línea de fluidos gaseosos y líquidos y monitoreo de fluidos de proceso para seguir niveles de contaminantes.

En fin, pareciera que podemos esperar muchos cambios en el futuro cercano. Uno de esos cambios, que ya he mencionado, es el microprocesador. Y es en este invento del s. XX en que gira el propósito de este trabajo al aplicarlo a los sistemas de control automático.

5.3 Field Bus o Red de Campo

Una red de campo o *fieldbus* es una alternativa al cableado convencional entre instrumentos/actuadores y el sistema de control. Actualmente, se usa cable estándar para conectar instrumentos y actuadores al sistema de control. Normalmente, un par de cables (o par torcido) conecta el instrumento con una caja unión en el campo. De ahí, las señales son llevadas por uno o más cables multiconductores dentro de los gabinetes de terminación antes de que las señales finalmente lleguen al sistema de control. Esto requiere ingeniería muy laboriosa y un gasto mayor.

La tendencia existe de empujar hacia un estándar el desarrollo de nuevos dispositivos que cambiarán dramáticamente el escenario antes descrito. El nuevo escenario, como se ve en los diversos grupos de desarrollo existentes como la ISA (*Instrument Society Of América*) y el *Norwegian Fieldbus Consortium*, consistirá de uno o más *fieldbuses* saliendo del sistema de control. Cada red puede manejar tantos como 100 instrumentos. Los instrumentos estarán conectados a la red con acopladores localizados en el mismo montaje. De aquí, una línea saldrá al instrumento. Este concepto termina con todos los cables multiconductores y gabinetes de terminación. Las cajas unión de campo serán reemplazadas por montajes con la misma capacidad que una caja unión convencional. El nuevo sistema reduce sustancialmente el cable requerido y por ende los costos de instalación.

Mucha gente el día de hoy piensa del *fieldbus* como instrumentación inteligente (por ejemplo, transmisores inteligentes y válvulas, etc.) Sin embargo, la visión de hoy del *fieldbus* tiende a desarrollar productos que puedan manejar todo tipo de instrumentación convencional, dejando abierta la posibilidad de incluir nuevos productos que el día de hoy están siendo desarrollados (ver sección 5.2 Sensores).

Los componentes del *fieldbus* están diseñados con los estándares de equipo ordinario de campo y usarlos no requiere de ningún tipo de habilidad especial. Las prácticas de ingeniería normal pueden aplicarse. Los productos son robustos y pueden soportar la tensión y el ambiente de la mayoría de los procesos industriales sin ninguna protección adicional.

La utilización del microprocesador en estos dispositivos permitirá llevar más y más algunas funciones de control de procesos justo al sitio de control de la variable, reduciendo los requerimientos de instalación de un sistema de control distribuido de hoy y logrando una distribución geográfica más amplia de éstas funciones, pero integrando más y más las diferentes áreas de una planta de proceso.

La pregunta obligada es ¿De vuelta a controladores locales?

5.4 Una Visión del Futuro

Algunas de las tendencias actuales de la tecnología cambiarán el futuro de la industria de la automatización. Estos cambios estarán impulsados por tres importantes factores: más altas expectativas de un cliente más demandante, nuevas tecnologías y la necesidad de estándares en la industria.

5.4.1 Avances tecnológicos

La potencia y capacidad del microprocesador continuará creciendo, abriendo oportunidades para aplicaciones que el día de hoy no son prácticas de implementarse en tiempo real. Por ejemplo, los algoritmos de control basados en matrices puede en teoría proveer un mejor desempeño que los métodos tradicionales basados en PID. La implementación práctica de dichos métodos ha estado limitada

por el desempeño del procesador requerido en el sistema de control distribuido básico.

La tecnología de los dispositivos para los desplegados en pantalla también tendrá un desarrollo importante. El Tubo de Rayos Catódicos (CRT), por más de veinte años el estándar en la tecnología de desplegados, ha observado muchas mejoras en los últimos años. El refinamiento de los Desplegados de Cristal Líquido (LCD) producirá tableros planos de alta resolución varias veces más grandes que los CRT's actuales.

Los continuos desarrollos tecnológicos permitirán ofrecer nuevas características de manera efectiva en costo y reflejándose en grandes mejoras en las funciones de la interfaz del operador

5.4.2 Estandares Industriales

Los "**Sistemas Abiertos**" se volverán una realidad en esta década trayendo solo algunos de los beneficios de la conectividad entre equipo y aplicaciones de múltiples proveedores, incluyendo las bases de datos estandarizadas bajo el concepto de "utilizar donde sea posible", con un enfoque de lenguajes comunes y ambientes operativos similares. Las comunicaciones en la planta integrarán voz, video y datos usando equipo y aplicaciones de software de diferentes proveedores.

A pesar de que el día de hoy existen estándares en muchas áreas importantes, todavía pasarán algunos años antes de que la utilización amplia por los principales proveedores haga práctica la instalación de sistemas a gran escala que usen componentes de "anaquel" estándar.

Los instrumentos "inteligentes" de campo han empezado a mostrar beneficios tangibles a los usuarios. Antes de que esta nueva generación de instrumentos pueda alcanzar su potencial deberá haber estándares prácticos de comunicación para facilitar su uso. Hoy, la conectividad entre algunos sistemas y la instrumentación inteligente es difícil. Cuando mucho, las conexiones de la

instrumentación analógica convencional son combinadas con el acceso digital en aquéllos parámetros de medición importantes. Durante los 90's el *field bus* verdadero deberá ser una realidad.

5.4.3 La Automatización en el Futuro

El sistema de control del futuro usara los avances en desplegados, microprocesadores y en comunicaciones para permitir la implementación práctica de estrategias de control avanzado, la mejor utilización del sistema y mejoras importantes en la interfaz del operador y en la eficiencia de la ingeniería. Al mismo tiempo, el sistema de control del futuro ofrecerá estas características a un costo instalado más bajo.

5.4.3.1 La Tecnología avanzada en un Mercado Global

Los objetivos básicos de los sistemas de automatización de procesos industriales en los años 90's permanecerán siendo calidad del producto mejorada y costos de producción más bajos, como siempre. Las funciones de la automatización de procesos se extenderán dramáticamente para incluir control en tiempo real integrado por computadoras (CIM) de toda la planta productiva como una empresa de negocio total.

5.4.3.2 El Nuevo Mercado

El mundo hoy en día es un gran mercado y se esta encogiendo rápidamente. La vision del mundo como un solo mercado para caso todo es de muy reciente desarrollo. Es la realización de un nuevo nivel de comercio internacional que solo se inició con los viajes de negocios mundiales después de la introducción de los aeroplanos turbopropulsados comerciales en los años 50's.

Actualmente, el mercado mundial esta creciendo a una velocidad explosiva y alimentándose vorazmente de los últimos desarrollos

en las comunicaciones incluyendo aquellas via satélite y maquinas de fscímiles las cuales hacen los negocios inmediatos prácticos entre las partes desde cualquier parte sobre la tierra.

5.4.4 Automatización Inteligente

Las computadoras y los controladores anteriormente padecía un retraso de aproximadamente tres años antes de que los nuevos desarrollos les alcanzaran; sin embargo, las comunicaciones de alta velocidad y la rápida disponibilidad de producto mencionadas antes parecen estar teniendo efecto en el desarrollo de los productos de control asi como en su mercadeo. La computadora personal, en particular y un amplio numero de software de control escrito para correr en Pc's, han sido incorporados extremadamente rápido en caso todos los sistemas de control de Iso proveedores.

Algunas computadoras ahora manejan software de **sistemas expertos** para ofrecer operacion en tiempo real y dirección en el mantenimiento, y este tipo de funciones avanzadas serán cada vez más comunes en Iso 90's. Los reportes de las compañías que ofrecen arquitecturas paralelas de computadoras indican un alto interés de los usuarios de control en técnicas de **redes neurálgicas y lógica difusa** que pueden improvisar mejor acciones de control que los sistemas expertos, los cuales se apoyan en el "conocimiento". La **inteligencia artificial** pueda tal vez ganar alguna medida real de inteligencia.

Posiblemente más importante, los sistemas de automatización de procesos ofrecerán más y más mejores y mas rápidos maneras de importar y exportar datos en tiempo real de las computadoras corporativas. Las bases de datos de la planta y de la empresa seran entonces la base de la producción y programación en tiempo real asi como del control de la producción, incluyendo materiales y la optimización del uso de la energía, para maximizar la competitividad de la planta en su propio mercado de negocios.

CAPITULO 6.

IMPACTO DE LA TECNOLOGIA DEL CONTROL DISTRIBUIDO.

6.1 El Problema de la Justificación Económica

Debido a que el monitoreo y control de planta sigue siendo teniendo como alternativa el control analógico o digital de tablero y en ocasiones a un menor costo, uno de los mayores problemas que el Sistema de Control Distribuido encuentra es la justificación económica. Realmente incrementa la productividad? Se tienen ganancias adicionales que justifiquen la inversión adicional dentro de los requerimientos financieros de la compañía?

Para que un Sistema de Control Distribuido sea económicamente viable, las posibles ganancias que se obtengan de tener un mejor control del proceso deben ser únicamente parte de una optimización económica general a implementar en la totalidad de la planta de acuerdo al criterio determinado por la Gerencia basado normalmente en una de las siguientes razones:

- 1.- Máxima producción a plena venta de producto
- 2.- Costos mínimos de operación con la planta abajo del nivel de máxima producción, incluyendo mínimos consumos de energéticos y/o materias primas.
- 3.- Máxima calidad donde sea apropiada

Es sabido que estas razones frecuentemente son mutuamente exclusivas.

En general, no podemos esperar milagros debido al control automático por si solo (con SCD o Sistema convencional).

Cuando estos milagros se presentan deben provenir de cambios en el diseño o de nuevos procesos que requieren menor consumo de

energéticos y/o materia prima para realizar la misma función, por ejemplo: cambios en los platos de una columna de destilación.

6.2 Productividad

Dependiendo del contexto que se dé. Productividad puede ser definida de diferentes maneras: "Unidades de producto hechas por hora hombre", "Utilidad por unidad de capital invertido", "Producción de unidades por periodo de tiempo para una planta específica, etc", etc.

La necesidad básica para la industria es el desarrollo de la calidad, por lo tanto, productividad estaría definida por "Utilidad por unidad de capital invertido", lo cual nos permite enfocarnos a tópicos de ahorro de energía y materias primas, así como mejoras en calidad para casos en que la venta del producto no esté asegurada y las ganancias de un Sistema de Control Distribuido deben ser Analizadas como un porcentaje de incremento o decremento de los niveles de operación de la producción, materia prima, uso de energía, etc., contra la planta sin este sistema de control.

La siguiente es una lista de ganancias en productividad esperadas con la instalación de un Sistema de Control Distribuido.

Las ganancias normalmente caen en dos categorías:

- Beneficios Tangibles (factor económico)

- 1.- Incremento de producción
- 2.- Incremento de Calidad del Producto
- 3.- Decremento de requerimientos energéticos
- 4.- Decremento de requerimiento de materia prima
- 5.- Decremento de efluentes y contaminantes
- 6.- Ahorro en Mano de Obra
- 7.- Reducción de la variabilidad del producto, menor desperdicio.
- 8.- Reducción de re-proceso

- Beneficios Intangibles

- 1.- Aumento de seguridad del Personal y de la Planta
- 2.- Mejor información gerencial para toma de decisiones
- 3.- Reducción de requerimientos de mantenimiento
- 4.- Flexibilidad del Sistema respecto a cambios o adiciones
- 5.- Mejoras en el servicio a clientes con respuestas oportunas y bien documentadas
- 6.- Mejor repuesta a emergencias
- 7.- Mejor programación de mantenimiento
- 8.- Impedimento de condiciones catastróficas en el equipo de proceso

6.3 Estudio de Beneficios

Para determinar los beneficios obtenibles por el uso de Sistemas de Control Distribuido y el Control Avanzado de Proceso y justificar su aplicación, se realizó un estudio de beneficios para una serie de plantas petroquímica identificando estos para cada uno de los niveles de sofisticación del control de procesos. De estudios anteriores y experiencia en casos similares al expuesto, las ganancias típicas globales que se pueden obtener por la utilización de un sistema moderno de control digital distribuido incluyendo control avanzado y optimización son de 6 a 13% en capacidad.

Las aplicaciones específicas se pueden dividir en:

- Sistema de Control Distribuido (DCS)	3 - 6%
- Control Avanzado de Proceso (APC)	1 - 2%
- Control Multivariable Predictivo	1 - 2%
- Optimización	1 - 2%
Total	6 - 13%

Estas son ganancias sustanciales para las unidades visitadas. Las ganancias convertidas a capacidad o condiciones de producción son, por

ejemplo, en una planta de etileno con una capacidad de diseño de 550 Ton/día de producción, 33 - 72 Ton/día.

Algunas estrategias de control más comunes entre diferentes procesos se describieron en la secciones 3.4 a 3.6 Algunas estrategias de control específicas se discuten en la sección más adelante. Estas estrategias no están limitadas a las aplicaciones de control, pero también incluyen las aplicaciones en las áreas donde se obtendrán beneficios intangibles, tales como una operación mas suave y flexible, aumento en la seguridad, cumplimiento consistente con las emisiones permitidas y posiblemente menos paros.

El alcance del presente trabajo de tesis por razones de ejecución real del proyecto, solo cubre los beneficios reportados por la instalación de varios sistemas de control distribuido, que es el tema central de la tesis; los beneficios estimados por la aplicación de estrategias de control avanzado quedaron pendientes de comprobarse ya que el proyecto sigue activo y su proceso de implementación continua hacia los niveles superiores de control de proceso y optimización.

6.4 Resumen

El estudio desarrollado consistió de un análisis de los beneficios en la operación actual conforme se van agregando o adicionando los diferentes niveles de control automático de procesos.

Los niveles de sofisticación del control automático escogidos fueron:

- a) Implementación de un Sistema de Control Distribuido moderno
- b) Implementación de técnicas de Control Avanzado de Procesos
- c) Implementación de Estrategias de Control Multivariable
- d) Optimización, si resulta apropiado

Las medidas de los beneficios de este estudio son, según aplique

- Incremento en la capacidad
- Incremento en los productos recuperados
- Reducción en el consumo de energía por unidad de producción
- Incremento de los intangibles por el Control

6.4.1 Alcance de Trabajo

El alcance del trabajo desarrollado en cada unidad visitada incluyó la revisión de la operación de la planta y la filosofía de control existente, a través de:

- Monitoreo de la operación de la planta.
- Discusiones con el personal de operación e ingeniería
- Evaluación de hojas de datos, reportes generados en computadoras, registros de producción y análisis de laboratorio.
- Revisión de los diagramas de diseño de Tubería e Instrumentación (DTI's).

Después de las revisiones anteriores se llevaron a cabo las siguientes tareas:

- La variabilidad de la planta se determinó por medio del análisis estadístico de las hojas de datos y los registros de producción.

- Utilizando los DTI's, las relaciones de producción de diseño, medida de energía por unidad de producto y relaciones de consumos de operación fueron generados. Estos fueron usados para comparar la operación de la planta contra el diseño.
- Basados en la variabilidad actual notada en la operación de la planta se prepararon los beneficios estimados del control.
- Los beneficios intangibles se determinaron en diversos niveles de control.

6.4.2 Beneficios

La medida mas sencilla de beneficios potenciales se basa en la variación de los análisis del producto, rendimientos, etc. sobre un período de prueba. Los beneficios pueden ser calculados de dos maneras.

- Cual es el incremento en la utilidad si el rendimiento pico actual se mantiene como promedio?
- Cual es el incremento en la utilidad cuando la desviación del rendimiento se reduce?

El primer método de cálculo produce invariablemente un resultado optimista y puede ser visto como el objetivo fundamental para una unidad bien controlada. En otras palabras, si la unidad opera con un rendimiento superior en cierto día, es físicamente posible llegar a operar de la misma forma todos los días con la correcta aplicación de Control de Procesos Avanzado.

El segundo método de cálculo deja un resultado realista basado en experiencia. El criterio de reducción en la desviación estandar del rendimiento crítico ha sido aplicado en numerosos proyectos. Se ha estimado la mejoría en el desempeño para aplicaciones individuales tales como control

avanzado residente en el Sistema de Control Distribuido (DCS), control multivariable predictivo residente en la computadora huésped (HOST) y optimización.

Un panorama general de los beneficios cualitativos que se proveen por los diversos niveles de sofisticación de control son analizados a continuación:

6.4.3 Planta de Etileno

La planta de etileno en cuestión tiene seis hornos de fraccionamiento. Los hornos están diseñados para procesar una carga de etano fresco y etano recirculado. La capacidad instalada es de 590 ton/día al 99.97% de pureza. El desempeño actual de la unidad fue determinado por las variaciones de la operación y producción sobre un periodo de tiempo dado.

La información evaluada consistió de:

- Análisis de laboratorio tomados por un mes los cuales reflejaron una semana típica de operaciones,
- Datos de operación de la planta tomados sobre un periodo de una semana en el mismo mes,
- Datos de producción mensual para los primeros 10 meses del año.

Lo anterior permitió determinar las ganancias potenciales de producción obtenidas manteniendo el desempeño pico de la planta. Las cantidades de producción mensuales de enero a octubre se muestran en la tabla 6.1. Los meses de marzo y agosto no fueron considerados en la evaluación del desempeño pico de la planta debido a datos sospechosos. Utilizando los meses restantes, la producción diaria promedio fue de 559.54 ton/día. Un desempeño pico de 590.11 ton/día se logró en el mes de abril. Si utilizáramos controles avanzados de proceso en la planta para mantener el desempeño máximo durante todos los meses, la producción podría incrementarse en 5.5 por ciento.

Tabla 1 Carga a la Planta de Etileno

<u>MES</u>	<u>DIAS</u>	Carga de Etano		Prod. de Etileno	
		<u>MES</u>	<u>DIA</u>	<u>MES</u>	<u>DIA</u>
Enero	31	23858.00	769.61	17308.62	558.34
Febrero	28	22365.00	798.75	15823.6	565.13
*Marzo	31	23074.00	744.32	14700.97	474.19
Abril	30	24259.00	808.63	17703.14	590.11
Mayo	31	24841.00	801.32	17777.50	573.47
Junio	30	24096.00	803.20	17249.07	574.97
Julio	31	25219.00	840.63	17430.03	562.26
** Agosto	31	13022.00	420.07	7003.09	225.91
Septiem.	30	22725.00	757.5	15652.00	521.73
Octubre	31	23035.00	743.07	16464.95	531.13

<u>MES</u>	<u>CARGA</u>	<u>GAS RESIDUAL</u>	<u>PROPANO & BUTANO</u>	<u>ETILENO</u>	<u>GAN./PERD. ION. METR.</u>
Enero	23858.0	4692.4	1857.0	17308.6	0.0
Febrero	22365.0	4964.4	1847.0	15823.6	+ 269.6
Marzo	23074.0	3784.0	1643.0	14701.0	- 2946.0
Abril	24259.0	4583.9	1962.0	17703.2	- 9.9
Mayo	24841.0	5062.5	1891.0	17777.5	- 110.0
Junio	24096.0	5004.9	1812.0	17249.07	- 30.0
Julio	25219.0	5602.0	2027.0	17430.03	- 160.0
Agosto	13022.0	2382.9	876.0	7003.09	- 2760.0
Sept.	22725.0	5078.0	1995.0	15652.00	0.0
Octubre	23035.0	4590.1	1930.0	16464.95	- 50.1

Tabla 2 Producción de Etileno

Nota: Todos los flujos son en miles de toneladas

* - Datos erróneos en apariencia debido al balance de materiales

** - Datos erróneos en apariencia debido al balance de materiales.

También parece que la planta estuvo fuera de operación parte del mes debido a los datos de carga y producción.

6.4.3.1 Problemas Identificados

Derivado de los datos presentados, el desempeño de la planta aparece poco satisfactorio. Tres de las áreas que contribuyen a este desempeño son:

- Los calentadores de etileno
- La torre demetanizadora
- El fraccionador de etileno

6.4.3.1.1 Calentadores de etileno

Se detectaron variaciones substanciales en la temperatura de salida de los serpentines en todos los calentadores de etileno. En la tabla 6.4 se muestran los datos obtenidos. Como resultado de los cambios en la temperatura de salida de los serpentines, el mol por ciento (%) de etileno en el afluente también varió. El promedio de etileno en el afluente fue 35.4% mol con una desviación estandar de 1.54. El valor mínimo encontrado en los datos fue de 29.88 mientras el valor máximo fue 37.69 con un diseño de 31.97% mol.

TABLA 3 TEMPERATURA DE SALIDA DE SERPENTINES DE LOS HORNO S

HORNO 3	SERPENTINES			
	1	2	3	4
TEMP. PROM. SAL. SERP. (°C)	842	839	844.1	840.8
DESVIACION DE ESTANDARD	4.7	4.7	4.3	4.8
TEMP. MIN. SAL. SERP. (°C)	827.0	828.0	829.0	829.0
TEMP. MAX. SAL. SERP. (°C)	850.0	848.0	854.0	852.0

TABLA 4 TEMPERATURA DE SALIDA DE SERPENTINES DE LOS HORNOS

HORNO 5	SERPENTINES			
	1	2	3	4
TEMP. PROM. SAL. SERP. (°C)	844.5	878.6	844.6	841.7
DESVIACION DE ESTANDARD	6.4	3.5	4.2	4.1
TEMP. MIN. SAL. SERP. (°C)	822.0	871.0	835.0	833.0
TEMP. MAX. SAL. SERP. (°C)	858.0	885.0	856.0	850.0

6.4.3.1.2 Torre demetanizadora

Comparando los datos de operación de la columna demetanizadora con plantas similares estudiadas, la torre parece estar siendo sobre-rehervida. Esta situación provoca pérdidas innecesarias de etileno en el domo. La información analizada mostró una pérdida de etileno promedio de 4.82% mol contra un diseño de 2.8% mol. La desviación estandard fue de 0.70 con una pérdida máxima de 5.78 y una pérdida mínima de 4.04 % mol.

6.4.3.1.3 Fraccionador de etileno

Los datos de operación en el fraccionador de etileno parecen indicar que cantidades innecesarias de etileno están siendo perdidas en las extracciones del fondo. Ver figura 6.7. Los datos revisados indicaron una pérdida promedio de 0.55 % mol con un diseño de 0.14% mol. La desviación estandard fue de 0.73 con una pérdida mínima de 0.01 % mol y una máxima de 3.52 % mol

6.4.4 Aplicaciones de Control

Los beneficios típicos debidos a la actualización con un Sistema de Control Distribuido son discutidos en la sección 4.3.

Un beneficio particular para la planta de etileno es el incremento en el flujo de información de la planta para el operador. Una planta de etileno contiene numerosos instrumentos. El Sistema de Control Distribuido permite al operador dar seguimiento a los cambios de proceso y hacer movimientos preventivos de control. Por ejemplo, si ocurriera un cambio en el área de destilación, el operador está inmediatamente al tanto del efecto en las unidades posteriores y en la composición. El sistema de control distribuido le permitirá tener un juicio más adecuado de las correcciones requeridas.

Los beneficios típicos, cuantitativos debidos a la implementación de estrategias de Control Avanzado son discutidos en la sección 3.6.

Las siguientes estrategias de control podrían ser aplicadas al proceso de etileno:

- Balance de pasos y control de temperatura de salida de calentador en los calentadores de fuego directo,
- Control de conversión o severidad en los hornos de etileno a través de control de la temperatura promedio de salida de tubos.
- Doble control de análisis de composición en los fraccionadores en donde aplique,
- Estrategias anticipatorias de relación de carga/reflujo y carga/rehervidor para todos los fraccionadores,
- Control de temperatura por peso promedio y presión compensada en fraccionadores donde aplique,
- Estrategias de control por restricciones en fraccionadores donde aplique.

El siguiente nivel de beneficios se obtienen de la Optimización con paquetes de software desarrollados a través de modelos cinéticos rigurosos de unidades específicas como los hornos de etileno.

Un esquema de optimización debe tener las siguientes consideraciones:

- Que el usuario dé la entrada de los valores de propiedades de carga, límites de disponibilidad de carga, requerimientos de producción, información económica, restricciones del equipo y otros datos para definir el problema. El "Punto Inicial", que consiste de un conjunto de valores iniciales para las variables independientes, se obtiene del usuario, leído de la documentación o de la base de datos de la planta.
- El usuario elige la función objetivo a ser utilizada. La función objetivo es el parámetro que el optimizador maximizará.
- El programa optimizador pasa los valores de las variables independientes a los modelos de proceso. Los modelos de proceso usan estos valores de las variables independientes, de las propiedades de la carga y cierta información fija de la planta para determinar las variables dependientes, las cuales incluyen:
 - + El balance de materiales de la planta
 - + El balance de servicios
 - + Cargas en sistemas de proceso individuales
 - + Temperaturas seleccionadas y esfuerzos
 - + Parámetros operativos de hornos de pirólisis e intercambiadores incluyendo el tiempo por cada corrida
 - + Rentabilidad.

Esta información se pasa de nuevo al optimizador.

- El optimizador verifica todas las variables dependientes contra las restricciones de la planta y las incluidas por el usuario y los

requerimientos de producción. Entonces, el optimizador almacena los valores de las variables independientes y las funciones objetivo correspondientes para referencias futuras.

- El optimizador genera un complejo inicial que consiste de un número de casos de prueba semi-aleatorios. El optimizador utiliza una técnica no-lineal para generar conjuntos de variables independientes para pruebas futuras. (El número exacto de casos depende del número de variables independientes).
- Se calcula el valor promedio de cada variable independiente para todos los casos. El peor de los casos de cada variable independiente es proyectado contra el valor promediado de dicha variable independiente. Conforme la optimización avanza, los valores de la función objetivo de todos los casos se acercan al óptimo.
- Cuando todos los valores de la función objetivo son iguales al mejor valor menos la tolerancia convenida (ajustada por el usuario), entonces el mejor punto es tomado como el óptimo.

Todos los tipos de optimizadores verifican las restricciones de la planta para asegurar que se ha encontrado un óptimo factible.

Existen varias funciones objetivo que el usuario puede seleccionar para un optimizador base y para un optimizador de carga. La función objetivo define el criterio por el cual la optimización se determina. Las funciones objetivo disponibles son:

- Utilidad máxima,
- Producción máxima de etileno,
- Producción máxima de propileno,
- Costo mínimo por unidad de producción de etileno,
- Costo mínimo por unidad de producción de propileno.

La función objetivo para un optimizador local es utilidad. Los datos usados por el optimizador pueden separarse en cuatro diferentes clases:

- datos de proceso vivo,
- datos de proceso incluidos manualmente,
- datos de definición del problema,
- datos técnicos fijos.

Los datos de proceso vivo consisten en datos en tiempo real obtenidos del sistema de control distribuido de la planta. Los datos que típicamente se incluyen por el ingeniero u operador para una corrida del optimizador se resumen a continuación:

Definición del problema: (típicamente introducido por un ingeniero)

- Restricciones en las variables independientes, tales como velocidad de carga del horno, relación vapor a hidrocarburo, presión de succión del compresor de gas de proceso y conversión del horno.
- Restricciones en diferentes variables dependientes tales como hidrogeno para producción de acetileno, colas de gas rico en metano y gasolina de pirolisis además de eficiencia horno, temperaturas del horno y eficiencia de intercambiadores y temperatura, por mencionar solo algunas de las variables.
- Límites de los productos y restricciones blandas,
- Especificaciones de producto,
- Datos económicos,
- Disponibilidad de carga del horno,
- Gastos de carga al horno fijos,
- Selección de función objetivo

Datos proporcionados por un operador:

- Datos varios del proceso (no disponible en los datos de tiempo real)
- Análisis de laboratorio de la carga,
- Datos de balance de materiales y combustible

CAPITULO 7.

CONCLUSIONES.

1.- En base a lo expuesto en los primeros tres capítulos de este trabajo, se concluye que la automatización es parte del proceso de la evolución de la vida misma del hombre, y que la humanidad en su búsqueda de un mejor modo de vida, ha sido la promotora del avance tecnológico que hemos visto en este siglo y utilizamos hoy en día.

2.- Los sensores de variables de proceso utilizan nuevas tecnologías. Los métodos básicos de medición de variables de proceso han cambiado radicalmente en la década pasada. En este pasado reciente, los fuelles y bourdones para presión han sido reemplazados por *strain gages* y diafragmas de sílice, los termopares han sido desplazados por *RTD's* más pequeños y termistores, y las placas de orificio han dado paso a los medidores vortex y de coriolis. Hoy, nuevas tecnologías están siendo aplicadas a estas mismas variables de proceso, y en el horizonte hay nuevas formas de medir variables que no podían medirse en el pasado. De los desarrollos mencionados y que actualmente se están utilizando por los principales fabricantes de sensores, transmisores, y otros elementos primarios están las estructuras de microsílíce, fibras ópticas y biosensores.

3.- También podemos concluir que la justificación de un sistema de control moderno está basada en diferentes tipos de beneficios: beneficios tangibles y beneficios intangibles. Dependiendo de la información que se puede obtener del proceso en el que se va a instalar un sistema de control moderno basado en tecnología digital, es el detalle del estudio que se puede hacer para justificar un proyecto de modernización. El método costo-beneficio es a veces tan evidente en plantas con instrumentación obsoleta que el simple hecho de tener un alto porcentaje del control de la planta en manual es suficiente para justificar un sistema nuevo.

4.- Es también inobjetable que las ventajas de la tecnología actual no sólo cubren los aspectos de modernización en una planta como la expuesta en el capítulo 6, sino que permiten al usuario plantear toda una nueva

estructura organizacional que vaya de acuerdo con los esquemas modernos de las grandes empresas en el mundo. La misma filosofía de operación se puede ver beneficiada al incrementar su eficiencia y mejorar el aprovechamiento de los recursos humanos disponibles. El argumento de mayor rentabilidad a base de recortar grandes cantidades de personal debido a la instalación de un sistema de control distribuido no es válido, sino por el contrario, dicho proyecto debe ser una oportunidad para capacitar a los mismos operadores y mejorar su nivel intelectual, proporcionándoles más tiempo para pensar en los verdaderos problemas de su producción permitiendo que el equipo les ayude a encontrar fallas cuando se presenten o a anticiparlas para evitarlas. La experiencia vivida en el proyecto descrito en ese mismo capítulo, me permite concluir que la capacidad del obrero mexicano está muy por encima de lo que se estima o cree en niveles superiores de la organización.

5.- Si bien es cierto que se requiere cierta habilidad para operar un sistema como el utilizado, también es cierto que la filosofía de diseño de estos equipos para su operación no requiere de conocimientos de computación, programación o electrónica. El concepto de "amigable" permite que el operador interactúe con el sistema y aprenda rápidamente a usarlo, desarrollando habilidades en muy poco tiempo, para mantenerlo él mismo.

6.- Si comparamos la situación anterior a la instalación del sistema de control distribuido con la situación actual, podemos concluir lo siguiente: El número de circuitos de control que actualmente permanecen en operación automática es el 100%. Esto significó un control más preciso con respecto al control tradicional. Las gráficas de tendencia dan una muestra de esto al desplegar menos variaciones con más resolución que un gráfico en papel, por ejemplo. Al contar con mayor resolución en la indicación de las variables controladas, se logró una mejor precisión en las variables críticas.

En el inicio de la operación del sistema, la utilización de los paquetes de aplicaciones que el sistema ofrece se realizó solo en circuitos de control

menos complejos y con bajo nivel de riesgo para la operación de la planta, con el fin de probar programas funcionales y confiables que ayudaran al personal de operación a familiarizarse con el sistema en sus nuevas modalidades de control.

Una vez logrado lo anterior, se implementaron aquellas secuencias de operación más delicada hasta lograr las mas complejas secuencias de paro y arranque en automático de las plantas. A los operadores se les facilitaron las maniobras de arranque y paro de la planta, reduciendo en forma global el tiempo improductivo inherente a paros no programados y programados.

Los cambios en la instrumentación de campo, de equipo neumático a equipo electrónico, mejoraron la exactitud de las variables medidas. Esto ayudó a mantener un control más estrecho de las materias primas utilizadas. El manejo adecuado de la carga permite mantener dentro de especificaciones al producto, reduciendo drásticamente la recirculación o reprocesamiento de producto fuera de especificaciones. La herramienta cuya utilización ha sido cada vez mayor es sin duda el llamado Control Estadístico de Procesos en tiempo real. Con esta se ha logrado una mayor eficiencia, por ejemplo, en la conversión en los reactores de azufre lo que ha representado una recuperación de hasta el 98% del azufre presente en el gas amargo y ahorros significativos en el consumo de energía.

7.- La cantidad de variables manejadas actualmente con el sistema de control distribuido ha aumentado, lo cual permite una supervisión más estrecha del proceso. Los sistemas de alarma, disparos y los condados (interlocks) de seguridad en el cierre y apertura de válvulas ha permitido prevenir descontrolés y una corrección rápida en caso de fallas.

La información en tiempo real esta mejor organizada en los gráficos dinámicos de cada área. El registro histórico permite efectuar comparaciones para detectar desviaciones en la operación y corregir los parámetros correspondientes.

La respuesta operativa en las emergencias tales como fallas de energía eléctrica, gas combustible, vapor, falla de equipos o variaciones de carga, pueden ser atendidas con oportunidad, lo cual permite actuar con

seguridad y precisión, evitando los incidentes que pudieran ocasionar lesiones al personal y afectar la vida útil de los equipos.

8.- El tiempo de mantenimiento está referido al tiempo de inmovilización del equipo por mantenimiento, debido a fallas, búsqueda y diagnóstico de las mismas o el tiempo de espera para la intervención de los equipos. Conceptualmente se conoce como mantenibilidad y se expresa en horas. El sistema cuenta con diagnósticos que generan reportes en los cuales aparece un registro cronológico de las fallas, la hora en que se presentan y las causas posibles. Los programas de mantenimiento preventivo se han establecido con base en la estadística de desempeño, con lo cual ha disminuido la tasa de fallas y los tiempos de mantenimiento se han acortado.

Los sistemas instalados tienen más de 950 días de operación en los cuales se han registrado un total aproximado de 102 fallas de *hardware* en 21 nodos. Estas fallas no han afectado la disponibilidad operacional de las plantas; como estamos hablando de 21 nodos, se trata de una tasa de 4.86 fallas por nodo, lo cual representa un tiempo de buen funcionamiento de 4690 horas/año.

9.- En relación a los costos de mantenimiento del sistema de control se ha disminuido por las siguientes razones:

- a) La disminución del mantenimiento correctivo. La cantidad de ordenes de trabajo por mantenimiento correctivo y la de horas-hombre del personal ocupado en estas funciones es cada vez menor. Se observa una disminución aproximada del 25%. esto representa 1300 horas-hombre ahorradas en un año.
- b) La disminución del costo de refaccionamiento. Comparando los costos de refaccionamiento del sistema anterior con el actual, los resultados arrojan un ahorro aproximado del 33%, lo que significa en términos monetarios aprox. N\$1'200,000.00 al año.
- c) Los aumentos del tiempo de operación del equipo. Con la utilización del control estadístico de proceso se lleva a cabo un monitoreo del comportamiento de los equipos, esto permite intervenir con oportunidades

en la limpieza de los cambiadores de calor, en el descarbonizado de hornos y en la rotación del equipo dinámico.

10.- La productividad del proceso ha sido impactada por aumentos en la producción, debido principalmente al mejor monitoreo de las variables que influyen en la medición de cargas y productos. Un aumento en la capacidad de procesamiento de gas amargo ha sido posible en las plantas endulzadoras, lo cual ha permitido incrementar la producción de azufre en 7,000 toneladas anuales.

También se ha disminuido la cantidad de producto fuera de especificación, disminuyendo por ende la cantidad reprocesada o enviada a quemadores.

La baja en consumo de servicios auxiliares como vapor, energía eléctrica, agua de enfriamiento, gas combustible, etc. ha sido posible al correlacionar sus consumos con el de otros elementos tales como la dietanol-amina y la composición del gas de carga.

11.- El entorno ecológico se ha visto beneficiado por la disminución de envíos al quemador y el mejoramiento de las chimeneas en lo que respecta a cantidades de ácido sulfhídrico y dióxido de azufre. Estos últimos componentes han sido disminuidos de las corrientes de salida en un orden del 70% inferior al diseño.

12.- Los parámetros que sirven para medir el impacto cultural son subjetivos, sin embargo, la formación de grupos técnicos cuya misión es la optimización de los procesos, ha sido un factor de motivación para la búsqueda de soluciones a los problemas que se presentan, para desarrollar al personal en la operación y mantenimiento del sistema de control distribuido con autosuficiencia.

El proceso de integración de los equipos, el trabajo en equipo, la comunicación y disposición personal, son fiel reflejo de la nueva actitud que prevalece en las personas que forman parte de la tripulación de las plantas. Las actividades resultan más interesantes y llenas de nuevas experiencias. El intercambio de experiencias entre los técnicos que

manejan procesos diferentes ha enriquecido las aplicaciones que pueden llevarse a cabo.

La adquisición de los equipos para los nuevos proyectos sigue involucrando a todo el personal que ha asimilado ya los conceptos y el saber-hacer de esta nueva tecnología de control distribuido, necesaria para seguir con las etapas de control avanzado y optimización del proceso. Para ello deberá seguirse usando la mejor tecnología de punta disponible en el mercado adecuada al entorno cultural del mexicano.

Actualmente se cuentan con once sistemas de control distribuido en operación en diversos centros de trabajo, los cuales operan en forma satisfactoria, encontrándose en la etapa de adquisición más sistemas para otras plantas de proceso y servicios. La transición del sistema de control anterior al sistema actual se efectuó sin detrimento de la seguridad de la operación y con los equipos en funcionamiento!

Esta primera etapa ha permitido planear la consecución de nuevos proyectos de expansión. La planta ahora es capaz de incrementar su producción y utilizar la misma plataforma tecnológica que se usó en este proyecto, sin preocupaciones de obsolescencia.

CAPITULO 8.

BIBLIOGRAFIA.

- 1) "Apuntes del Curso Electrónico: Técnicas Eléctricas Taylor"
Combustion Engineering
Taylor Instrument S.A. de C.V. México
- 2) Babb, M. "Single-Point I/O Boosts Controller Family"
Control Engineering, a Cahners Publication, April 1991.
- 3) Bailey, S.J. "Autonomous Decisions Sources for Today's Automated Plants"
Control Engineering, July 1988 p.75-78.
- 4) Bailey S.J. "Instruments Connected to Plant Networks Control Process Temperature in '88"
Control Engineering January 1988
- 5) Barragán, P. L. "Introducción a la Tecnología del Control Digital"
I.M.P. Subdirección General de Capacitación y Desarrollo Profesional, México.
- 6) Barragán, P. L. "Teoría y Aplicaciones del Control Automático. Curso Corto. I.S.A. Sección Mexico A.C."
- 7) Blickley, G.J., "Reference Guide to PID Tuning"
A Collection of reprinted articles of PID tuning techniques
Control Engineering, A Cahners Publication
- 8) Buckley, P.S. "Techniques of Process Control".
John Wiley & Sons, Inc.
New York, 1964.

- 9) Caldwell, W. I. "Frequency Response for Process Control".
McGraw-Hill Book Co.
New York, 1959.
- 10) Campbell, D. P. "Process Dynamics".
John Wiley & Sons Inc.
New York, 1958
- 11) Considine, D. M. "Process Instruments and Controls Handbook".
McGraw-Hill Book Co.
U.S.A., 1957.
- 12) Domínguez, H. "Seguridad en Instrumentación"
Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos
- 13) Eckman, D.P. "Automatic Process Control"
John Wiley & Sons, Inc.
New York, 1958
- 14) "Elementos de Control Automático"
Datos Técnicos TDS-10A120E.
Taylor Instrument (México) S.A. de C.V.
- 15) Flores V., G. "La Importancia del Control Distribuido"
IMIQ Sección Coatzacoalcos, Seminario de Automatización
ABB Equipos y Sistemas S.A. de C.V. 1990.
- 16) Grolier, "Enciclopedia de las Ciencias"
Sexta Edición 1983, Tomo 10, p178-81.
Editorial Cumbre S.A.

- 17) Harriott, P. "Process Control".
McGraw-Hill Book Co.
New York, 1964
- 18) Howard, K.P. "Handbook of Instrumentation and Control" 2a. Ed.
McGraw-Hill 1977
- 19) Hutchinson, J.W. "ISA Handbook of Control Valves"
ISA, Pittsburgh, Pennsylvania.
- 20) "Introduction to Local Area Networks".
Digital Equipment Co.
U.S.A., 1982.
- 21) Kane, L. "H P In Perspective"
Hydrocarbon Processing, January 1990, p.19.
- 22) Krantz, L. "Future Visions" ABB Perspective
ABB Process Automation, Rochester, N.Y. 1991
- 23) Liptak, B.G. "Instrumentation in the Processing Industries" 2a. Ed.
Chilton Book Co. 1980
- 24) López Mora, J.C. "Participación de la Ingeniería Química en la
Petroquímica Básica y sus Perspectivas hacia el Año 2000"
XXVIII Convención Nacional del I.M.I.Q.
IMIQ, Año XXXI Vol. 7 p.11-13.
- 25) Mastachi P., J.D. y Villanueva A., G. "Impacto de la Tecnología de los
Sistemas de Control Distribuido en las Plantas de Pemex Gas y
Petroquímica básica"
IMIQ XXXIV Convención Nacional, Veracruz, México 1994.

- 26) "MOD 300 Literacy Package"
Combustion Engineering Co.
Taylor Educational Centers
Taylor Instrument 1985
- 27) Nacif, N. J. "Ingeniería de Control Automático. (Instrumentación Industrial)". 1a. Ed. Tomo I.
Ed. La Ilustración.
México.
- 28) Nacif, N. J. "Ingeniería de Control Automático. (Instrumentación Industrial)". 1a. Ed. Tomo II.
Costa-Amic Editores S.A.
México, 1981.
- 29) Norman, A. A. "Instrumentation for Process Measurement and Control".
3a. Ed.
Chilton Book Co. 1980.
- 30) Perry, R.H. y Chilton, C.H. "Chemical Engineers Handbook" 5a. Ed.
McGraw-Hill 1973
- 30) "Process Control: What users say"
Hydrocarbon Processing
International Edition February 1986
ISSN 0018-8190
- 31) Rohde, E. "Control Distribuido".
Centro de Educación de Taylor Instrumentos S. A.
Buenos Aires, Arg.

- 32) Romero, E. "Evaluación Costo-Beneficio de un Proyecto de Automatización Industrial"
I.M.I.Q. Curso de Instrumentación y Control de Proceso, Agosto 1987
- 33) "Sensors Smarts"
Combustion Engineering World
Combustion Engineering Inc. Connecticut, September 1988.
- 34) Shinsky, F.G. "Process Control Systems"
McGraw-Hill Book Co. Inc.
New York 1967
- 35) Tenney III, A.S. "Applying Radiation Thermometers to Process and Lab Measurements"
In Tech, Houston TX. August 1988, p.49-53.
- 36) Tucker, G.K. and Wills, D.M. "A Simplified Technique of Control System Engineering".
Minneapolis 1962
- 37) Wade, H.L. "High-Capability Single-Station Controllers: A Survey"
In Tech, Houston TX. September 1988, p.106-113.
- 38) Whitehouse, D. "MAP for the Process Industries: Winners and Losers"
In Tech, Houston TX. March 1988
- 39) Zoss, L.M. and Delahooke, B.C. "Theory and Applications of Industrial Process Control"
Delmar Publishers Inc.
Albany N.Y. 1961.