

23  
Zeje.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
"ZARAGOZA"

"APLICACION DE UN SISTEMA DE CONTROL  
DISTRIBUIDO A UN PROCESO INDUSTRIAL"

T E S I S

QUE PARA OPTAR EL TITULO DE  
LICENCIADO EN INGENIERIA  
Q U I M I C A

P R E S E N T A N :  
ARELI OROPEZA GRANDE  
GABRIEL PEREZ AGUIAR ARCEO

MOISES ARMANDO VAZQUEZ *sánchez*

MEXICO, D. F.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

1994



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES \*ZARAGOZA\*

JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA

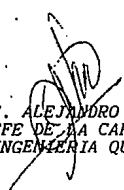
SRES. ARELI OROPEZA GRANDE,  
GABRIEL PEREZ AGUIAR ARCEO Y  
MOISES ARMANDO VAZQUEZ SANCHEZ,  
P R E S E N T E.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, para el Examen Profesional, le comunico que la Jefatura a mi cargo ha propuesto la siguiente designación:

PRESIDENTE: ING. ALEJANDRO ROGEL RAMIREZ  
VOCAL: ING. RENE DE LA MORA MEDINA  
SECRETARIO: ING. FERNANDO HERRERA JUAREZ  
SUPLENTE: ING. JOSE ANTONIO GONZALEZ HERNANDEZ  
SUPLENTE: ING. ELIUD MORGADO LOPEZ

A T E N T A M E N T E  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

México, D.F., 7 de abril de 1994



M. en C. ALEJANDRO RUIZ CANCINO  
JEFE DE LA CARRERA DE  
INGENIERIA QUIMICA

Irm

BA JO LA ASESORÍA DEL:

ING. RENÉ DE LA MORA MEDINA

Agradezco a Dios por hacerme sentir auténticamente humano. Agradezco profundamente su paciencia y cariño a lo largo de toda mi vida a los Señores Alvaro Oropeza R. y Angela Grande V., su amor y apoyo incondicional a Gabriel Pérez Aguiar A., su gran amistad a Aida, Sandra e Iván, y sus buenos deseos a mis abuelitos y tíos.

ARELI

Agradezco a mi país y a mis padres la oportunidad de formarme. A Are por ser mi azul más profundo. A mis hermanitas por aguantarme. A la señora Chayo, al señor José, a Sandy y a Aida por recibirme de la manera más cálida que he conocido. A Héctor por su generosidad. Al profesor Carlos Javier Martínez Gómez por todo lo que representa en mí. Al profesor Salvador Gallegos por su perspectiva del conocimiento. A Mari por tratarme tan bien. A mi tíos Paco y Meche por preocuparse, y a sus niñitos por apoyarme. A mi Nina, a mi tía Lourdes y a mi tío Poncho por alentarme a ser el mejor. A Ramón, a Luis y a todas aquellas personas del IMP que nos ayudaron a entender un poco del DCS.

GABRIEL

El triunfo es un logro de un conjunto de personas, es por esto que agradezco primeramente a dios por haberme permitido terminar mi carrera, a mis hermanos, Candy I. y Guillermo, por su apoyo y paciencia y ante todo a mi Madre, Lucila Sánchez Cortés, por su comprensión, sabiduría, empuje y amor y saberme guiar para alcanzar la meta deseada y ser siempre optimista.

Así mismo agradezco a mis tías, primos y demás familiares.

MOISES ARMANDO

Dedicamos este trabajo a la Facultad de Estudios Superiores "Zaragoza", a los profesores que laboran en ella, al Ing. René de la Mora Medina, a nuestros compañeros de grupo y de Facultad, a nuestros amigos Nelly, Claudia(s), Jorge, Jaime y Chayo.

También hacemos un reconocimiento a la generosidad de Héctor Loza y a todas aquellas personas que al igual que él contribuyeron a la realización de este trabajo.

ARELI  
MOISES  
GABRIEL

# ÍNDICE DE CONTENIDO

PÁGINA

## INTRODUCCIÓN

### CAPÍTULO I. GENERALIDADES.

1.1 DEFINICIÓN DE UN PROCESO INDUSTRIAL	11
1.2 IMPORTANCIA DEL CONTROL DE PROCESOS	14
1.3 CONCEPTOS BÁSICOS DEL CONTROL	15
1.4 ELEMENTOS PARA EL ANÁLISIS DEL CONTROL	19

### CAPÍTULO II. EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE PROCESOS.

2.1 CONTROL MANUAL	23
2.2 CONTROL AUTOMÁTICO	25
2.3 TEORÍA DEL CONTROL AUTOMÁTICO	35
2.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS SISTEMAS DE CONTROL	51

### CAPÍTULO III. INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS.

3.1 FILOSOFÍAS DE CONTROL DE REACTORES	53
3.2 FILOSOFÍAS DE CONTROL PARA COLUMNAS DE DESTILACIÓN	59
3.3 FILOSOFÍAS DE CONTROL PARA COMPRESORES CENTRIFUGOS	66
3.4 FILOSOFÍAS DE CONTROL PARA GENERADORES DE VAPOR	74
3.5 SELECCIÓN DE BOMBAS	83
3.6 TIPOS MÁS COMUNES DE VÁLVULAS USADAS EN LOS PROCESOS INDUSTRIALES	90

**CAPÍTULO IV. SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO.**

4.1 CONCEPTO GENERAL DE UN SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO (DCS)	98
4.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE OPERACIÓN DE UN DCS	105
4.3 ELEMENTOS DE UN CONTROL DISTRIBUIDO	108
4.4 SISTEMAS DE CONTROL DISTRIBUIDO	116
4.5 SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO DCI-4000	121

**CAPÍTULO V. APLICACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO AL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ACETONA.**

5.1 PRODUCCIÓN DE ACETONA	189
5.2 DOCUMENTOS BÁSICOS DE INSTRUMENTACIÓN	192
5.3 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL DISTRIBUIDO AL PROCESO DE ACETONA	201

<b>CONCLUSIONES</b>	<b>211</b>
---------------------	------------

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>213</b>
---------------------	------------

**APÉNDICES**

APÉNDICE 1	216
APÉNDICE 2	219



## ÍNDICE DE FIGURAS

PÁGINA

### CAPÍTULO I. GENERALIDADES.

FIGURA 1.1 DIAGRAMA DEL PROCESO DE ACETONA	13
FIGURA 1.2 CONTROL DE TEMPERATURA EN UN TANQUE	16
FIGURA 1.3 DIAGRAMA SIMBÓLICO DE LOS ELEMENTOS INVOLUCRADOS EN UN CIRCUITO DE CONTROL	18

### CAPÍTULO II. EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE PROCESOS.

FIGURA 2.1 CONTROL DE NIVEL DE LÍQUIDO OPERADO POR UN FLOTADOR	24
FIGURA 2.2 PROCESO SENCILLO DE INTERCAMBIO DE CALOR	26
FIGURA 2.3 CONTROL MANUAL	27
FIGURA 2.4 LOOP ANALÓGICO	29
FIGURA 2.5 LOOP DE CONTROL ANALÓGICO CON UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	30
FIGURA 2.6 SISTEMA DIGITAL APLICADO A UN LOOP DE CONTROL	33
FIGURA 2.7 ESQUEMA DEL DCS DE HONEYWELL (TDC-2000)	36
FIGURA 2.8 TANQUE DE CALENTAMIENTO	37
FIGURA 2.9 ACCIÓN DE CONTROL PARA CONSERVAR LA TEMPERATURA	39
FIGURA 2.10 A) PROCESO, B) LOOP FEEDBACK	40
FIGURA 2.11 CONTROL DE ALIMENTACIÓN FEEDBACK DE PROCESO DE INTERCAMBIO DE CALOR	42
FIGURA 2.12 CONTROL EN CASCADA PARA LA TEMPERATURA DE UN BAÑO	43
FIGURA 2.13 CONTROL DE TEMPERATURA DE UN BAÑO	44

**CAPÍTULO III. INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS.**

FIGURA 3.1 A), B) Y C) SISTEMAS DE REACTORES BATCH	55
FIGURA 3.1 D), E) Y F) SISTEMAS DE REACTORES BATCH	56
FIGURA 3.1 G), H), I) Y J) SISTEMAS DE REACTORES BATCH	57
FIGURA 3.2 SISTEMA DE CONTROL DE pH	58
FIGURA 3.3 CONTROL FEEDBACK Y FEEDFORWARD	60
FIGURA 3.4 COLUMNA DE DESTILACIÓN CON UNA ALIMENTACIÓN, UN CONDENSADOR TOTAL Y HERVIDOR	62
FIGURA 3.5 CONTROL POR BALANCE DE ENERGÍA EN UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN	64
FIGURA 3.6 PRESIÓN DE LA COLUMNA CONSTANTE	65
FIGURA 3.7 CONTROL DIRECTO DEL BALANCE DE MATERIAL	67
FIGURA 3.8 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE COMPRESOR CENTRÍFUGO	68
FIGURA 3.9 CURVAS DE UN COMPRESOR CENTRÍFUGO	70
FIGURA 3.10 CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN COMPRESOR CENTRÍFUGO	73
FIGURA 3.11 CONTROL DE UN ELEMENTO	77
FIGURA 3.12 SISTEMA DE TRES ELEMENTOS	79
FIGURA 3.13 CONTROL MAESTRO DE PRESIÓN	80
FIGURA 3.14 CONTROL DE COMBUSTIÓN TIPO LEAD-LAG	82
FIGURA 3.15 INTERVALOS DE USO DE BOMBAS	84
FIGURA 3.16 CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS DE PISTÓN	85
FIGURA 3.17 BOMBA DE DIAFRAGMA	87
FIGURA 3.18 CLASIFICACIÓN DE BOMBAS CENTRÍFUGAS	88
FIGURA 3.19 BOMBA DE TURBINA	89
FIGURA 3.20 ESTRUCTURAS DE VÁLVULAS DE CONTROL	92

**CAPÍTULO IV. SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO.**

FIGURA 4.1 SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO	99
FIGURA 4.2 NIVELES Y TAREAS DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PROCESOS INTEGRAL	101
FIGURA 4.3 CONTROL DE PRIMER NIVEL	102
FIGURA 4.4 ESTRATEGIA BÁSICA DE CONTROL	103
FIGURA 4.5 VISTA GLOBAL DEL FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO DEL MICROPROCESADOR	104
FIGURA 4.6 CONTROL DE SEGUNDO NIVEL	106
FIGURA 4.7 ESTRATEGIA AVANZADA DE CONTROL	107
FIGURA 4.8 ESTACIÓN INTEGRAL DE OPERADOR	109
FIGURA 4.9 ESTRUCTURA FÍSICA DE UN CONTROL DISTRIBUIDO	111
FIGURA 4.10 ESTRUCTURA DE UN NODO DE ADQUISICIÓN DE DATOS	112
FIGURA 4.11 MÓDULOS DE ENTRADAS ANALÓGICAS	113
FIGURA 4.12 ARQUITECTURAS DE COMUNICACIÓN	115
FIGURA 4.13 DISPONIBILIDAD DE LA UNIDAD DE CONTROL DISTRIBUIDO	128
FIGURA 4.14 VISTA FRONTAL DEL CHASIS	131
FIGURA 4.15 VISTA POSTERIOR DEL CHASIS	132
FIGURA 4.16 LOOP DE CONTROL DE FLUJO	134
FIGURA 4.17 CONFIGURACIÓN DE LA SEÑAL ANALÓGICA DE DENSIDAD	137
FIGURA 4.18 INTERCONEXIÓN DE LA ACU	138
FIGURA 4.19 ESTRATEGIA UNIVERSAL PARA EL SEGUNDO NIVEL	139
FIGURA 4.20 VISTA DEL CONTROLADOR EN EL CRT	141
FIGURA 4.21 PARTE DEL TECLADO PARA LLEVAR A CABO LOS AJUSTES DE CONTROL	142
FIGURA 4.22 ENTRADAS Y SALIDAS DE LA ACU	145

FIGURA 4.23 CONEXIONES DE LA LOP	148
FIGURA 4.24 LA LOP CONSTA DE UN CRT Y UN TECLADO	149
FIGURA 4.25 CONSOLA LOCAL DEL OPERADOR	151
FIGURA 4.26 ESLABONAJE DE COMUNICACIÓN	152
FIGURA 4.27 DESPLIEGUE COMPLETO DE SUMARIO	154
FIGURA 4.28 INDICADOR DE DESPLIGUE DE GRUPO	155
FIGURA 4.29 DESPLIGUE DEL CONTROLADOR	155
FIGURA 4.30 DESPLIGUE DE SECUENCIA	155
FIGURA 4.31 VERSIONES DE LAS UNIDADES DE CONTROL DISTRIBUIDO	161
FIGURA 4.32 MÓDULO TÍPICO DE CONTROLWARE	162
FIGURA 4.33 TIPOS DE CÁLCULO ARITMÉTICO	167
FIGURA 4.34 GENERADOR DE FUNCIÓN	169
FIGURA 4.35 DCI-4000 EN UN LOOP EN CASCADA	171
FIGURA 4.36. APLICACIÓN DE CONTROL DE TEMPERATURA EN UN PROCESO BATCH	173
FIGURA 4.37 CONTROLADOR ON/OFF Y VÁLVULA RELEVADORA DEL OPERADOR	175
FIGURA 4.38 RELACIÓN DE MÓDULOS	179
FIGURA 4.39 FUNCIÓN DEL MÓDULO DE PASOS	181
FIGURA 4.40 INTERCONEXIÓN TÍPICA DEL MÓDULOS DE PASOS	184
FIGURA 4.41 LÍNEA DE CONFIGURACIÓN	187

## **CAPÍTULO V. APLICACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO AL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ACETONA.**

FIGURA 5.1 PRODUCCIÓN DE ACETONA EN EL MUNDO	190
FIGURA 5.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO	193
FIGURA 5.3 ESQUEMA DE INSTRUMENTACIÓN DE COMPRESOR DE AIRE	195
FIGURA 5.4 ESQUEMA DE INSTRUMENTACIÓN DEL REACTOR DE OXIDACIÓN	196

FIGURA 5.5 ESQUEMA DE INSTRUMENTACIÓN DE UN SOLOAIRE	197
FIGURA 5.6 ESQUEMA DE INSTRUMENTACIÓN DE UN EVAPORADOR	198
FIGURA 5.7 ESQUEMA DE INSTRUMENTACIÓN DEL REACTOR DE SEPARACIÓN	199
FIGURA 5.8 ESQUEMA DE INSTRUMENTACIÓN DE UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN	200
FIGURA 5.9 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DCI-4000 AL PROCESO DE ACETONA	205
FIGURA 5.10 A) DESPLEGADO DE PROCESO EN LA SECCIÓN 1	206
FIGURA 5.10 B) DESPLEGADO DE PROCESO EN LA SECCIÓN 2	207
FIGURA 5.10 C) DESPLEGADO DE PROCESO EN LA SECCIÓN 3	208
FIGURA 5.10 D) DESPLEGADO DE PROCESO EN LA SECCIÓN 4	209
FIGURA 5.10 E) DESPLEGADO DE PROCESO EN LA SECCIÓN 5	210

## RESUMEN

En este trabajo se recopiló la información básica de los sistemas de control convencionales y la teoría de control distribuido. De la cual se eligió el sistema DCI-4000 que posteriormente se aplicó al proceso industrial: producción de acetona a partir de cumeno.

La aplicación del DCS consistió en establecer una arquitectura de control distribuido que adaptada a los esquemas básicos de instrumentación permitiera mejorar el control de dicha planta de proceso.

## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se aplicó la filosofía de control distribuido al proceso petroquímico para la producción de acetona, partiendo de las bases de control e instrumentación convencional.

El mismo constituye una síntesis de tipo bibliográfico para sistemas de control y control distribuido dirigida a aquellas personas que desean conocer los fundamentos de un sistema de control distribuido, éste constituye un aspecto relevante en la modernización de las plantas de proceso industrial, además se les considera sistemas de control idóneos con vistas a la máxima optimización de los recursos, con base a la magnitud y grado de complejidad de las instalaciones industriales.

Este trabajo se elaboró con el deseo principal de compartir esta información, difícilmente expuesta y con dificultades para su explotación. La información contenida en el mismo, no pretende de ninguna forma abarcar el amplio campo del control avanzado, pero si sentar las bases que permitirán comprender más fácilmente esta interesante rama.

Los objetivos se describen a continuación:

1. Establecer el desarrollo de los sistemas de control de procesos.
2. Establecer los esquemas básicos de instrumentación y control del proceso de acetona.
3. Aplicar un sistema de control distribuido al proceso de producción de acetona.

El compendio parte de la definición de control de procesos dentro de la industria para posteriormente abordar la evolución en los sistemas de control, estableciendo además las ventajas y desventajas de los mismos.

Como parte fundamental del control, se incluyen las bases de instrumentación para conformar el contexto teórico en el cual se apoyan las filosofías de control modernas, tal como la filosofía de control distribuido que se describe ampliamente en un apartado. Finalmente esta filosofía es adaptada al proceso industrial de producción de acetona.

## CAPÍTULO I. GENERALIDADES

Coordinar la producción de un volumen con la mejor calidad, requiere de un riguroso control de cada una de las etapas del proceso además del empleo de materias primas de alta calidad. Este control de proceso se efectúa mediante la constante supervisión de ciertos parámetros indicadores de la correcta transformación físico química de las materias primas con los energéticos en el tiempo adecuado que darán por resultado el producto final.

Los parámetros referidos anteriormente son los denominados variables de proceso y pueden ser de origen físico y/o químico. La vigencia de tales variables está en función de su comportamiento implícito en primera instancia y de las dimensiones dentro del proceso en segunda. Todo esto requiere una estrategia específica de control para tal vigencia. Dicha estrategia se basa en la selección y sintonía adecuada del controlador así como la aplicación correcta del elemento final de control que responda en forma eficiente a las decisiones del controlador. Los controladores, localizados estratégicamente en las áreas de proceso y soportados por su instrumentación de respaldo indicadores, alarmas, registradores, integradores, computadores analógicos, sistemas de secuencia, timers, etc., proceden a llevar a cabo el control de procesos.

Tal acción es de vital importancia dentro de la industria, pues se encarga del funcionamiento correcto de la misma, manteniendo las condiciones fijadas, supervisando y manejando las condiciones de emergencia, detectando la aparición de éstas, e incluso previniéndolas y actuando de forma apropiada. Es capaz de cambiar las condiciones operacionales en función del mercado, las características de los productos y el criterio económico correspondiente, es entonces, elemental abordar el tema del avance del control de procesos para el mejoramiento de la industria.

### 1.1 DEFINICIÓN DE UN PROCESO INDUSTRIAL.

Un *proceso* puede ser cualquier serie o conjunto de pasos que incluyan cambios en la composición química o cambios físicos en el material a preparar, procesar, separar o purificar. Dentro de la práctica de la ingeniería química se pueden realizar desdoblamientos de procesos complejos en etapas físicas y elementales así como también en reacciones químicas. Estas etapas físicas elementales son las *operaciones unitarias* las cuales se basan en una secuencia de pasos variantes y con posibilidades de reducirse a operaciones sencillas o bien a reacciones idénticas en sus fundamentos pero diferentes en cuanto a su material.

Cada uno de los procesos se puede dividir en una serie de etapas, denominadas operaciones, repetidas a lo largo de los distintos procesos. Las operaciones individuales poseen técnicas comunes y se basan en los mismos procesos científicos. Mediante el estudio sistemático de las operaciones se unifica y resulta más sencillo el tratamiento de todos los procesos. Las operaciones básicas son igualmente aplicables a procesos físicos y químicos.

Si una de las etapas de la fabricación es de naturaleza fundamentalmente física se llama



**operación unitaria**, si la etapa envuelve un cambio químico esencial tal como la hidrólisis, cristalización, hidrogenación, oxidación, esterificación y nitración se denomina **proceso unitario**. En los procesos unitarios se incluyen además cambios de naturaleza biológica y fisiológica.

El material de ingreso a un proceso se conoce como **entrada o alimentación** al proceso, mientras el de abandono se llama **salida o producto**.

Una **unidad de proceso** es un equipo o dispositivo en el cual se lleva a cabo una de las operaciones que forman parte del proceso. Cada unidad de proceso lleva asociadas una serie de entradas y salidas conocidas como **corrientes de proceso**, consistentes en los materiales de entrada y salida de la unidad

Por otra parte, se debe considerar dentro de la industria la existencia de dos tipos de procesos muy distintos, y por supuesto con problemas diferentes. Por un lado se tienen los procesos de **tipo condoné**, que son básicamente de tipo químico y se conocen como **proceso de producción** o simplemente **procesos**, éstos se caracterizan por ser continuamente alimentados y consecuentemente, de forma continua el producto es retirado. Por otro, están los de **tipo batch o intermitente**, en ellos se trabaja sobre unidades discretas, independientes entre sí, luego se unen para obtener equipos o sistemas, ésta es la industria de los **procesos de fabricación**. Estos procesos son cargados al inicio, y descargados hasta que la operación se ha llevado a cabo.

En los "procesos", las materias manipuladas son casi siempre gases o líquidos, y cuando no es así, no se opera sobre unidades individuales, sino sobre un flujo de producto. Esta diferencia es esencial con los "procesos de fabricación" que trabajan sobre cada pieza o unidad, con tratamientos individuales.

A manera de ejemplo se mostrará el proceso "Hércules and Kellogg" diseñado para producir acetona (figura 1.1). En este proceso, se alimenta cumeno en (1) y (2) y es oxidado bajo condiciones suaves de aire para producir hidropéroxido de cumeno, el cual es concentrado y separado en fenol y acetona en presencia de un catalizador ácido (3). El catalizador es eliminado y la mezcla es fraccionada para producir fenol de alta pureza (6), (7) y (8) y los productos de acetona en (4) y (5).

De la figura 1.1 (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7) y (8) representan las unidades de proceso, las líneas que unen a dos o más unidades de proceso son las corrientes de proceso y la flecha sobre cada línea indica la dirección del flujo, es decir, las entradas y salidas a cada unidad. El cumeno, el aire y el catalizador son las entradas o alimentaciones, mientras la acetona y el fenol son los productos finales.

Al ingeniero químico, se le puede requerir para el diseño de las unidades individuales de proceso (reactores, torres de destilación, intercambiadores de calor, etc.), para supervisar la operación de un proceso, o para modificar el diseño de un proceso de manera que éste se acomode a un cambio en la alimentación o en las características deseadas en el producto.

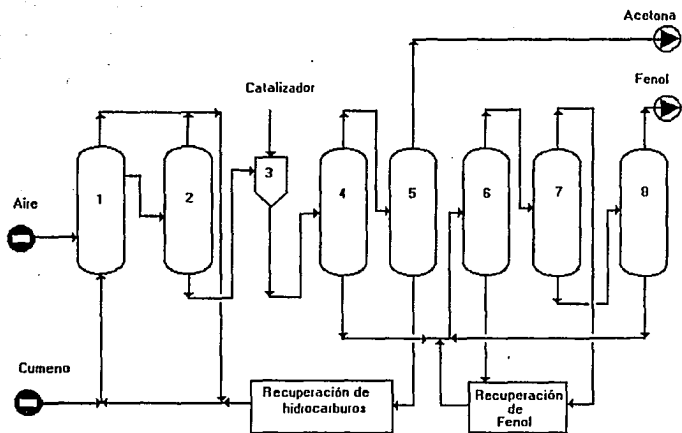


FIGURA 1.1 DIAGRAMA DEL PROCESO DE ACETONA

Como regla general, para llevar a cabo estas tareas, deben conocerse las cantidades, composiciones y condiciones de los materiales que entran y abandonan cada unidad de proceso, y en caso de trabajar con una unidad en existencia, deberá ser posible medir de manera suficiente estas cantidades para verificar si el proceso lleva a efecto sus objetivos de manera adecuada.

## 1.2 IMPORTANCIA DEL CONTROL DE PROCESOS.

De una manera estricta el *Control*, es el proceso realizado mediante estructuras naturales o artificiales, en el cual, cantidades variables son inducidas a ajustarse a una regla preestablecida. De acuerdo a esta definición, es obvio señalar que cualquier "proceso" debe ser estrictamente controlado, para ajustarse a los requerimientos de producción, calidad y optimización del mismo

Los procesos se controlan con mayor precisión para dar productos más uniformes y de alta calidad, ésto representa con frecuencia mayores ganancias. El beneficio del proceso es la ventaja más importante buscada al aplicar el control, la calidad del control y su costo se deben comparar con los beneficios económicos esperados y los objetivos técnicos del proceso. Los beneficios económicos incluyen la reducción de los costos de operación, mantenimiento y producto fuera de especificaciones, junto con el mejoramiento de la funcionalidad del proceso y todo lo que ello implica.

Una de las metas de instrumentar y controlar un proceso es la protección del personal y del equipo. El grupo de dispositivos designados para desempeñar esta función es frecuentemente llamada instrumentación de seguridad. Dichos dispositivos se instalan para prevenir el desarrollo de condiciones peligrosas, para detectar el grado de un peligro existente, para eliminar condiciones peligrosas y capacitar al operador en prevención de daños al equipo y accidentes. Ejemplos de tales instrumentos son, detectores de gases tóxicos o explosivos, pHmetros, alarmas de presión, válvulas y venteos de seguridad, etc.

Se considera al control como parte vital dentro de la calidad de los productos de un proceso. Lo anterior no es una tarea fácil pues implica la selección de los instrumentos para este propósito. La experiencia, la documentación histórica y la simulación por computadora son herramientas para desarrollar sistemas de control apropiados a los procesos en desarrollo.

La adquisición de datos para el balance de materia y energía es otro de los objetivos del control, en este sentido no solo el flujo de las corrientes de entrada y salida debe medirse, sino también sus propiedades tales como temperatura, presión, densidad y humedad conforme transcurre el tiempo.

El consumo o generación de energía por unidad o planta debe ser controlado en orden de calcular relaciones específicas del consumo y los balances de energía. De acuerdo a los valores de las corrientes, la presión y el método de medición pueden determinarse individualmente, factores como los costos contables, pérdidas de energía y ahorros probables.

También es importante controlar para satisfacer los requerimientos de los estándares relevantes, códigos de seguridad y regulaciones del tipo local o general con respecto a los límites de emisión máximos permitidos en el ambiente, y así prevenir consecuencias legales, penalizaciones o altas multas por no cumplir con las normas de seguridad establecidas por el gobierno.

### 1.3 CONCEPTOS BÁSICOS DEL CONTROL.

La automatización del control, se refiere a la ejecución de las tareas físicas y mentales involucradas en el proceso del control, anteriormente se citó su misión, ésta es mantener constante la magnitud de una variable deseada (controlada) o hacer variar dicho valor de una manera prefijada, esta operación antes realizada por el ser humano, ahora se realiza mediante máquinas u "operadores artificiales", quienes llevan acabo actividades menos propias del hombre, tales como el esfuerzo, la potencia y la repetición sin variaciones, reservando para el humano la actividad creadora y el empleo de la inteligencia.

La automatización industrial no es un fenómeno reciente. Desde que la actividad industrial sustituyó la apreciación subjetiva del operario, el hombre a procurado obtener el máximo rendimiento del trabajo, mediante la acción combinada de herramientas, máquinas y organización. Sin embargo aunque con distinta incidencia sobre los diferentes sectores industriales, este proceso de automatización ha estado sometido a una creciente aceleración basada en nuevas teorías, inventos y tecnologías, reduciéndose cada vez más el intervalo transcurrido entre el hallazgo y su aplicación industrial.

El campo del *control automático* no es la excepción a estos avances, sin embargo, su concepto básico es el mismo, se puede definir como *el mantenimiento del valor de cierta condición a través de su medida, de la determinación de la desviación en relación con el valor deseado, punto de ajuste o set point, y de la utilización de la desviación para así generar y aplicar una acción de control capaz de reducir o anular la desviación.*

Para ejemplificar tal concepto, se considerara el control de la temperatura del agua en un tanque, como se muestra en la figura 1 2

De todas las magnitudes relativas al sistema (nivel de agua, presión, densidad, pH, energía suministrada, salinidad, etc.) la magnitud que nos interesa regular en este caso es la temperatura del agua. La temperatura es entonces la *variable controlada* y para medir su valor actual es necesario un instrumento de medición, en este caso un termómetro de bulbo. Las dilataciones y contracciones del fluido contenido dentro del bulbo obligarán al "bourdon" (tubo curvo de sección elipsoidal) a enrollarse o desenrollarse. Los movimientos del extremo del bourdon indican la temperatura del agua, la misma puede leerse en una escala. En el diagrama se representa un contacto eléctrico en el extremo del bourdon y otro contacto de posición ajustable a voluntad. Este conjunto constituye un *termóstato*. Se enfatiza que la temperatura del agua debe mantenerse en la vecindad de los 50°C. Este valor de la temperatura del agua es el valor deseado.

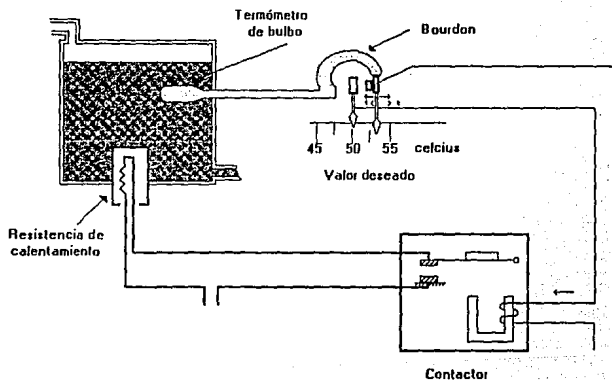


FIGURA 1.2 CONTROL DE TEMPERATURA EN UN TANQUE

Si la temperatura por cualquier motivo (perturbación o *variable de carga*), sobrepasa el valor deseado, el contacto del termostato queda abierto. La bobina del contactor no está excitada y éste mantiene interrumpida la alimentación de la resistencia de calentamiento. Al no haber suministro de calor, la temperatura del agua bajará debido a las pérdidas, y la temperatura se acercará al valor deseado. Cuando por el contrario, la temperatura es inferior al valor deseado, el bourdon se enrolla y cierra el contactor del termostato alimentador de la resistencia de calentamiento. En consecuencia, la temperatura del agua en el depósito subirá para llegar de nuevo al valor deseado.

Normalmente los circuitos de control son mucho más elaborados, sin embargo, en este sencillo ejemplo se encuentran sus funciones esenciales.

**Medida.** A cargo del sistema termométrico.

**Comparación.** Efectuada por el sistema de contactos (posición relativa).

**Generación de la señal de conexión.** Efectuada también por el sistema de contactos y por el resto del circuito eléctrico del termostato.

**Corrección.** Desempeñada por el órgano de control.

Nótese que, para la conexión de la variable controlada (temperatura) se actuará sobre una variable (cantidad de calor suministrado al depósito). La acción del control se aplicará normalmente a otra variable de la cual depende la variable controlada, y se designa con el nombre de *variable manipulada*.

En nuestro ejemplo, la señal de control, puede ser la corriente eléctrica  $i$ . En la mayor parte de los casos la señal que relaciona la señal de control con la desviación es mucho más elaborada, pero se pueden representar las diversas funciones y variables en un diagrama simbólico como en la figura 1.3.

Para comprender mejor dicha figura es necesario definir los siguientes términos:

**Variable.** Aquel nivel, cantidad o valor que esta sujeto a cambiar; ésta puede ser regulada (como la variable controlada) o simplemente medida (como la medición barométrica de la presión atmosférica).

**Variable manipulada.** Es la cantidad o condición que es variada por el control automático de manera que afecte el valor de la variable controlada.

**Punto de ajuste o set point.** Es el punto con el cual el controlador es ajustado para regular el proceso.

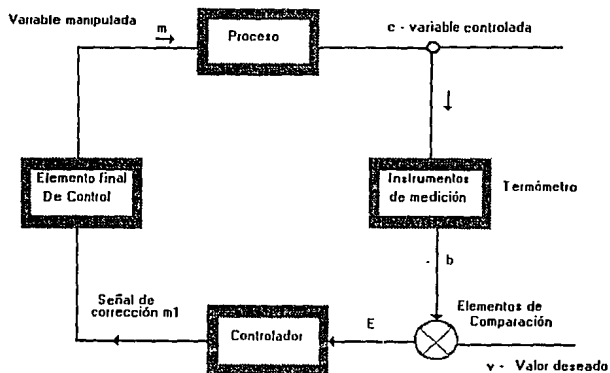


FIGURA 1.3 DIAGRAMA SIMBOLICO DE LOS ELEMENTOS INVOLUCRADOS EN UN CIRCUITO DE CONTROL

**Elemento de medición.** Es el elemento que convierte una variable medible a una forma o lenguaje que puede entender el controlador.

**Controlador.** Es un mecanismo que mide el valor de una cantidad o condición variable y actúa para corregir o limitar la desviación de esa cantidad o condición con respecto a un punto de ajuste.

**Elemento final de control.** Es aquella porción del "sistema de control" el cual directamente cambia el valor de la variable manipulable.

Algunos de los elementos de medida y los elementos de comparación forman normalmente parte de los instrumentos llamados *controladores*. Los controladores más difundidos hasta hace poco tiempo eran los controladores neumáticos, sin embargo, los controladores electrónicos cada vez tienen mayor utilización, y ya sobrepasan en número, a los del tipo neumático.

#### 1.4 ELEMENTOS PARA EL ANÁLISIS DEL CONTROL.

Para poder plantear el problema del control de un proceso se hace imprescindible conocer cómo se comporta éste y cómo evoluciona su salida para determinadas evoluciones de la entrada. Normalmente este conocimiento del proceso o no es completo, o es tan complejo de expresar mediante una formulación matemática, que no resulta útil o manejable para el control. Esta formulación abstracta del comportamiento del proceso se conoce como *modelo*. La representación de fenómenos por modelos es una actividad connatural de la ciencia, intenta explicar cuanto ocurre, e indica si un determinado fenómeno se comporta "*como si...*".

Desde el punto de vista del control sólo interesa conocer el comportamiento interno del proceso, en cuanto nos permite describir sus interacciones con el medio exterior. El modelo a elaborar depende, por tanto, de su utilización, es decir, en nuestro caso, debe describir el comportamiento de la salida a lo largo del tiempo, en función de las entradas y perturbaciones que pueda recibir el sistema.

Existe una técnica de representación basada en suponer que el proceso se comporta de acuerdo con una expresión matemática escogida a priori, normalmente una ecuación diferencial de orden  $n$  (puede valer 3, 4 ó 5) lineal de coeficientes constantes, completable con un retardo puro. En este caso se desconocen todos los coeficientes y se procede, a partir de la etapa de identificación y ajuste de los parámetros. Existen técnicas para obtener modelos sencillos de procesos complejos y determinar cuál es el orden del modelo mejor ajustado al comportamiento real y el valor de los parámetros de este modelo.

Los modelos pueden ser de varios tipos: *Continuos*, cuando las variables adquieren valores en cualquier instante, o *Discretos*, cuando los toman sólo en instantes prefijados, periódicos o no. Estos modelos discretos son muy apropiados para el control digital mediante computadoras. Pueden ser determinísticos, si se toman valores completamente predecibles, o estocásticos, si las señales están contaminadas por ruidos aleatorios, de parámetros concentrados,



si se expresan por funciones dependientes del tiempo, y su comportamiento entonces se describe por ecuaciones diferenciales ordinarias, o de parámetros distribuidos expresados por funciones dependientes del tiempo y el espacio, y se describen por ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.

Todos estos tipos pueden ser lineales, cuando la suma de acciones produce un efecto suma de los efectos, o no lineales. Estos últimos son mucho más difíciles de tratar, para ello se establecen modelos simplificados, linealizados. Para conseguirlo, se toma un punto de funcionamiento y se deduce el modelo no lineal, derivándolo, un modelo de las variaciones del modelo alrededor de dicho punto, pero considerando sólo las primeras derivadas.

Normalmente, los modelos empleados son del tipo dinámico, pues describen la evolución del proceso en función del tiempo. En determinados casos, cuando esta evolución es lo suficientemente rápida como para ser despreciada, el modelo describe únicamente el funcionamiento del proceso en el equilibrio, tratándose de un modelo estático. Cuando esto ocurre, y el proceso está en equilibrio, se dice que se encuentra en estado estacionario. Al producirse un cambio en una de las entradas, el proceso evoluciona hasta alcanzar un nuevo estado estacionario. Esta evolución, función del tiempo se denomina *transitorio* del sistema.

Para la representación del modelo en el caso de ser lineal continuo se suele emplear la *transformada de Laplace*, consiste en una proyección del sistema sobre el plano complejo, con lo que la ecuación diferencial se convierte en algebraica, función de la variable  $s$  compleja, que transforma las integraciones en divisiones por  $s$  y las derivadas del tiempo en productos por  $s$ , facilitando extraordinariamente el cálculo. El proceso queda representado por un coeficiente de polinomios en  $s$ , conocido como *función de transferencia*, el cual representa la relación entrada/salida. De ella se obtienen los *parámetros* caracterizadores del sistema, *las constantes de tiempo* con indicadores de la velocidad de respuesta en los transitorios, el *tiempo de retardo* informa del tiempo transcurrido desde que se produce una variación en la entrada hasta que se empieza a notar su efecto en la salida, y la *ganancia*, considerada como la relación entre la variación producida en la salida y la variación de la entrada que lo genera.

Otra forma de representar el comportamiento de un proceso consiste en establecer un sistema de *ecuaciones diferenciales de primer orden* de unas variables que representan el estado interno del sistema. Estas variables pueden o no tener significado físico y se pueden elegir de muy distintas maneras. Esta representación se conoce como *representación de estado* y la ecuación, como *ecuación de estado*. Va acompañada de otra que relaciona los estados con la salida. En el conjunto de variables de estado que caracterizan a un proceso, se encuentra contenida la historia de su evolución y de las entradas actuantes sobre él.

Para concluir este capítulo mencionaremos que la primera estrategia de control automático fue el control analógico con limitaciones técnicas de transmisión. Las acciones de control se verificaban empleando la energía del proceso mismo y la indicación de la variable era de tipo geográfico, es decir, en el lugar mismo del fenómeno.

La evolución de los medios de transmisión de señales analógicas; primero neumáticos, después fluidicos y finalmente eléctricos permitieron la estrategia de control digital. Finalmente la estrategia de control por distribución funcional aprovechando la gran capacidad, pequeñez y bajo costo de los microprocesadores da lugar al control distribuido, el cual se puede definir básicamente como un sistema de control digital apto para cualquier tipo de instalación, caracterizado por un fuerte componente informático, con una distribución funcional y espacial de sus aplicaciones. Operando de acuerdo con una estructura jerarquizada basada en microprocesadores, siendo posible "colgar" computadoras y estaciones para la ejecución de tareas especialmente asignadas; debido a su naturaleza hardware/software, son los sistemas de control mejor capacitados para resolver satisfactoriamente no solo las funciones de control en sí, sino aquellas como proveer información en tiempo real, crear las correspondientes bases de datos y relacionar el proceso con otras funciones de la planta tales como análisis, stocks, planificación, mantenimiento, gestión, etc. culminando de esta forma con el concepto de control integral.

## CAPÍTULO II. EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE PROCESOS.

Antes del siglo XX ya se había planteado el problema del mando de los procesos de forma automática, llegándose en algunos casos a soluciones asombrosas para la época. El ejemplo más conocido es el llamado *gobernador*, para el control de una máquina de vapor, sin embargo, durante mucho tiempo el control se llevó a cabo de una forma totalmente manual. Los sentidos del operario miden la evolución del proceso para corregir las desviaciones existentes, comprobando que las acciones llevadas a cabo tienen el efecto previsto, hasta conseguir alcanzar el comportamiento deseado. Este control manual depende totalmente de la apreciación subjetiva del operario con las consiguientes variaciones en la calidad del producto resultante.

La siguiente etapa de la evolución aparece con la introducción de los dispositivos de medida y grabación. Los primeros proporcionan al operador información exacta, rápida, consistente y siempre igual en las mismas condiciones. Los segundos le informan de la evolución evitándole la anotación continua. Sin embargo, el modelo del comportamiento deseado todavía no está formalizado y la comparación entre éste y los resultados dados por las medidas, sigue haciéndola el operario, al igual, la ejecución de las correcciones necesarias.

Para que el mando se realice de forma automática es preciso "sustituir al hombre" por un dispositivo físico, que automáticamente realice las tareas de comparación y producción de la acción correctora. El operario se ocupa entonces de establecer el patrón de comportamiento con el que ha de compararse, para fijar la forma en la cual el dispositivo debe de terminar la acción correctora.

Toda esta evolución en el control de procesos tuvo lugar en un largo período. Los dispositivos empleados eran básicamente neumáticos o mecánicos. Aunque el control era un arte basado en la intuición, las consideraciones eran cualitativas más que cuantitativas y las diferentes partes del proceso se medían y controlaban independientemente.

El cambio se produce durante la segunda guerra mundial, al ser necesarios los sistemas de control. Los trabajos de Nyquist, Black, Rynorslay y otros basados en el estudio del comportamiento en el dominio de la frecuencia por haberse desarrollado en la teoría de circuitos, empiezan a constituir un cuerpo teórico en sí mismos, conocido como teoría de *control de retroalimentación o feedback*. Simultáneamente prosiguen los estudios como los de Campbell, sobre la dinámica de los procesos, y todo ello permite plantear el control de proceso por primera vez sin considerar únicamente la instrumentación, sino teniendo en cuenta además, el conjunto proceso-instrumentación y proceder al diseño de los sistemas de control de procesos con técnicas cuantitativas.

A partir de este momento, la evolución continúa con ritmo creciente, incorporando no sólo los estudios teóricos de la teoría de control, la optimización y la dinámica de los procesos, sino también los avances en los equipos: sensores, controladores, electrónica, computadores y microprocesadores, según van apareciendo.

Al mismo tiempo aparece el microprocesador digital, que utilizaba integración de circuitos a gran escala. Estos microprocesadores alteraron la economía básica de los sistemas de control mediante la fabricación del sistema lógico digital con sus inherentes ventajas en confiabilidad, precisión y flexibilidad.

Finalmente, la estrategia por distribución funcional aprovechando la gran capacidad, pequeñez y bajo costo de los microprocesadores da lugar al control distribuido.

## 2.1 CONTROL MANUAL

### DESARROLLO HISTÓRICO DEL CONTROL MANUAL.

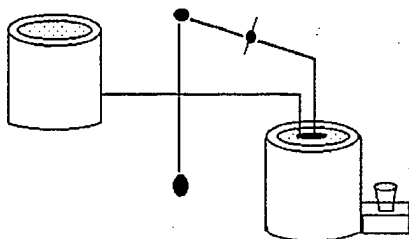
Es necesario contemplar que las más antiguas y desarrolladas civilizaciones usaban o tenían contemplado el uso del control de procesos. En el siglo I D.C., Heron de Alejandría describe una gran variedad de mecanismos, y aunque el objetivo principal era demostrativo, dichos mecanismos tuvieron un significado práctico considerable. El motor de reacción es, por supuesto, el más conocido, pero no el de mayor interés, dentro de sus escritos de neumática, en ellos aparece una descripción del primer equipo de control automático con feedback, como el mostrado en la figura 2.1. Este es el prototipo de todos los controles que operan con flotadores hoy en día. Muchos otros intentos de introducir cualquier forma de acción automática en las plantas industriales fueron hechos muchos siglos después de Heron. Bajo la estauración en Inglaterra se realizaron experimentos con varios motores de vapor<sup>1</sup> y algunos de los resultados y modelos obtenidos, probablemente el de Morland, propició el equipamiento con una válvula interactuante. En la siguiente generación, Tomas Savery, inspirado en los escritos de Somerset, desarrolló y patentó en 1698 una bomba del tipo pulsómetro.

Conforme el tiempo transcurre, muchos y variados controles son desarrollados por investigadores, quienes darian importancia cada vez mayor a la regulación de las variables del proceso, he aquí el nacimiento del control manual que ayudado por la instrumentación de procesos, sería empleado por mucho tiempo utilizando primordialmente al elemento humano para operar dichos instrumentos.

A principios de los años 40's las plantas de procesos químicos funcionaban manualmente, sólo usaban los controladores elementales y se necesitaban muchos operadores para observar las variables del proceso. Se usaban varios tanques que actuaban como amortiguadores entre las unidades de la planta, aunque algunas veces, estos tanques resultaban muy costosos, también ejercían la función de filtro de algunos disturbios dinámicos aislando una parte del proceso de las restantes.

---

<sup>1</sup> Los experimentadores incluyen a hombres como: David Ramsay, Edward Somerset y Samuel Morland, quienes fueron considerados por Carlos II como amos de la mecánica.



**FIGURA 2.1 CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDO  
OPERADO POR FLOTADOR.**

## CONCEPTOS BÁSICOS DEL CONTROL MANUAL.

*El control manual exige la presencia de muchos operadores en una planta de proceso, moviendo controles manualmente, tomando lecturas y decisiones acerca de la operación del proceso para cambiar flujos, niveles, temperaturas, y operar válvulas manualmente. Por ejemplo, en el caso del control feedback, según la figura 2.2<sup>2</sup>, el operador mide periódicamente la temperatura; suponiendo que ésta sea inferior al valor deseado, el operador aumenta la circulación de vapor abriendo levemente la válvula, es decir controla manualmente.*

La función del operador humano es relativamente simple, como oprimir un botón cuando una luz se enciende o mover una perilla de un punto a otro. En el control de procesos él generalmente observa la lectura de un instrumento de medición y opera una válvula reguladora manual correctamente para mantener la lectura del instrumento a un valor deseado. En esencia, el operador humano cierra el loop<sup>3</sup> de control entre la señal de salida del proceso y el elemento que regula la variable manipulable, lleva a cabo las funciones de discriminación de error y su corrección, como aparece en la figura 2.3, en donde se observa que aún en el control manual existen sistemas de loop cerrado.

Un sistema manual, está naturalmente sujeto a las limitaciones del elemento humano; éstas son principalmente el tiempo de reacción humano a un estímulo dado, el cual varía de persona a persona, dependiendo de las condiciones de salud y ambiente. Lo anterior no discute que la habilidad humana pueda controlar algunos procesos con éxito. No obstante, es difícil mantener la concentración en el individuo por largos períodos de tiempo lo cual provoca disminución de la eficiencia. El más complejo de los procesos y la más rápida de las reacciones hará más difícil la labor del operador humano al intentar mantener un control satisfactorio durante períodos largos.

### 2.2 CONTROL AUTOMÁTICO.

## DESARROLLO HISTÓRICO DEL CONTROL ANALÓGICO.

Durante la época en la que se operaban los procesos bajo el control manual, la operación del control de procesos resultó ser bastante tediosa y no muy atractiva, esto obliga a los ingenieros e investigadores a realizar estudios acerca del control de procesos, de este estudio surge un nuevo modo de control, el cual ya emplea un dispositivo sensible a la temperatura para producir una señal (eléctrica, neumática, etc.) proporcional a la temperatura medida. Esta señal se alimenta a un controlador que la compara con un valor preestablecido o setpoint, si existe alguna diferencia, el controlador cambia la posición del elemento final de control según convenga. Este modo de control es llamado feedback o control analógico y representa el primer intento de automatización del control. A pesar de ser usado como tal, durante un largo período, se hacen mejoras al sistema

---

<sup>2</sup> El objetivo de este sistema es mantener el líquido de salida a una temperatura dada.

<sup>3</sup> Este concepto será definido ampliamente en la sección 2.3.

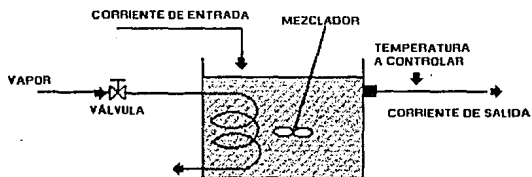


FIGURA 2.2 PROCESO SENCILLO DE INTERCAMBIO DE CALOR.

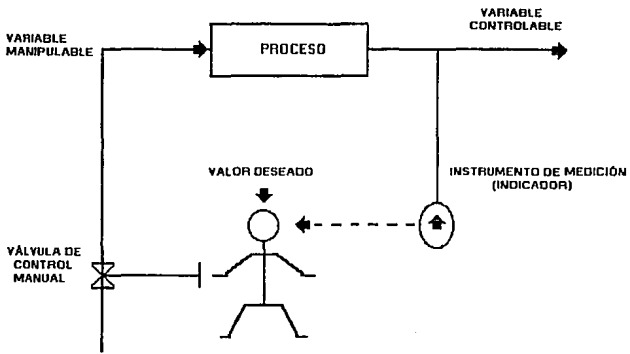


FIGURA 2.3 CONTROL MANUAL.



en cuanto al funcionamiento de los controladores (de neumáticos a electrónicos), a la comunicación de datos entre ellos, a la complejidad del algoritmo de control (avanzó de proporcional hasta proporcional integral derivativo PID), a la precisión de las pantallas y a otros adelantos tecnológicos.

Posteriormente surge el desarrollo de las computadoras digitales, las cuales complementaban muchas actividades de los procesos industriales, pero en el control no fué así; ya que éstas hacían uso de los controladores analógicos, así como de los reguladores de línea frontal. Lo cual implicó que hasta mediados de los años 60's el control analógico seguía manteniendo su posición en el mercado, aún cuando ya existían nuevos adelantos.

La demanda de la instrumentación analógica aumentó en la proporción de la densidad de la misma, el operador tenía mucha información por cuidar en el cuarto de control conforme aumentaba la capacidad de transmisión y conforme aumentaban los instrumentos colocados sobre el panel.

Este nuevo modo de control desarrolló los transmisores, y las señales pudieron ser llevadas desde su fuente hasta distancias lejanas, la instrumentación para un área específica de producción pudo ser agrupada en un tablero cercano al proceso, entonces el operador pudo tomar sus decisiones y ajustes mientras observaba los registros de las variables relacionadas en el mismo tablero, también pudo hacer otras cosas en el área, pero el tablero se convirtió en un punto importante de sus actividades de operación.

## CONCEPTOS BÁSICOS DEL CONTROL ANALÓGICO.

El control analógico mejora la precisión de las acciones que pudiera llevar a cabo un operador humano. Al incluir ciertos equipos, las variables medibles pueden compararse al mismo tiempo y la respuesta de estos controladores puede variar de acuerdo al proceso, como se puede observar en la figura 2.4 *el control analógico* se divide en 2 secciones; una se encuentra en campo y la otra se encuentra en el panel de control. En campo se encuentra un elemento que permite medir la variable a controlar y la transmite hasta el controlador. El controlador analógico transforma la señal recibida (neumática, de presión diferencial, etc.) a una señal eléctrica, toma la acción correspondiente y transmite nuevamente una señal que actúa sobre el elemento final de control para modificar la variable manipulable.

Los controladores analógicos también pueden ser adaptados a un sistema de control digital, esto ocurre cuando se desea tener una mayor exactitud en cuanto al registro y a la lectura de la variable a controlar para llevar a cabo un procedimiento más estricto en el control de proceso, como se observa en la figura 2.5, al añadir un sistema digital, el loop analógico cuenta con tres secciones básicas; la de campo, la de panel de control y la de sistema digital.

La capacidad de simulación que por diseño poseen los controladores analógicos, hace relativamente sencillo de implementar y operar el control para casi todas las variables de proceso. Muchos sistemas físicos pueden describirse en forma matemática por ecuaciones

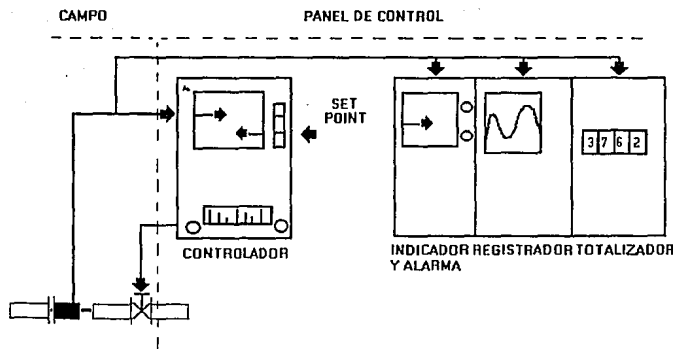


FIGURA 2.4 LOOP ANALOGICO.

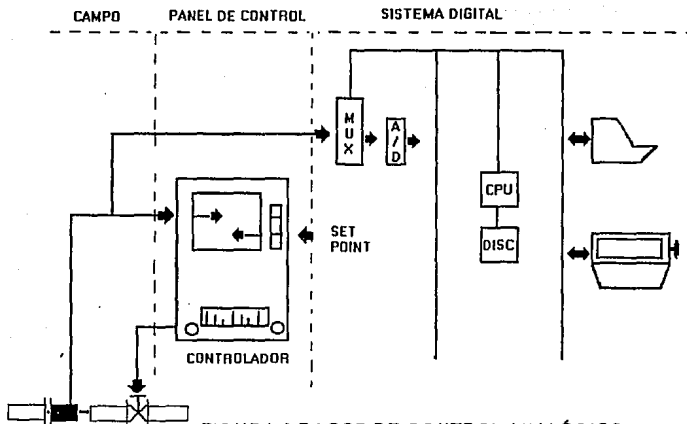


FIGURA 2.5 LOOP DE CONTROL ANALÓGICO CON UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

diferenciales cuyas soluciones, como una función del tiempo, dan el comportamiento matemático completo del sistema.

Los controladores analógicos (ayudados por las computadoras analógicas) realizan una simulación de un sistema físico. Cada sección de la computadora es la análoga de una porción particular del proceso bajo estudio. Las variables en la computadora analógica se representan por señales analógicas<sup>4</sup>, por lo común son voltajes eléctricos variantes con el tiempo. Las variables de señal se comportan de la misma forma que el proceso y en consecuencia, las mediciones de voltaje analógico pueden sustituirse por las variables del proceso.

## DESARROLLO HISTÓRICO DEL CONTROL DIGITAL DIRECTO.

La filosofía de control digital directo incorpora en la memoria de la computadora no sólo el modelo matemático del proceso sino también las subrutinas desempeñadas por los controladores, así como los modos de control (ganancia, constante de tiempo y tiempo muerto) y las acciones de cada control. Adicionalmente a la capacidad de remitir y enviar señales digitales; complementan la capacidad de controlar los procesos continuos con sus secuencias de seguridad y paro de emergencia, también en los discontinuos o por lotes; dosifica el control en cada una de sus etapas bajo las condiciones establecidas para ello, ya sean digitales o analógicas.

La computadora digital juega el papel clave en los sistemas de instrumentación y control. Las computadoras digitales originales utilizaban válvulas al vacío, fue la invención del transistor en 1948 y el circuito integrado de silicio una década después, lo que hizo posible la aparición de las computadoras digitales como se conocen actualmente. A su vez, la demanda de computadoras digitales más baratas, pequeñas, rápidas y más potentes, han acelerado el desarrollo de la microelectrónica.

El desarrollo de los microprocesadores (microcomputadoras) hace unos 8 años debe considerarse como el inicio de una nueva era en la aplicación de la microelectrónica o electrónica moderna. Por primera vez, el concepto de computación distribuida o inteligencia distribuida, es factible, por la inclusión de los microprocesadores en una variedad de dispositivos, como instrumentos y terminales de computadora, estos dispositivos adquieren un grado de inteligencia o "ingenio" que les permite realizar un procesamiento considerable. Si se desea, estos procesadores locales pueden diseñarse para comunicarse entre ellos mismos como con una computadora central más potente para posterior procesamiento y toma de decisiones de más alto nivel.

Las computadoras digitales entraron en escena del control de procesos siguiendo su aplicación primaria en la refinería de Puerto Arturo de Texaco (Texas) en 1958. El desarrollo de las técnicas del control digital (involucrando a la computadora en la regulación del control

---

<sup>4</sup> La mayor parte de las señales en nuestro mundo son analógicas. El nombre se deriva del hecho de que esa señal es análoga a la señal física que representa. La magnitud de una señal analógica puede tomar cualquier valor, es decir, la amplitud de una señal analógica presenta una variación continua sobre su intervalo de actividad.

primario) comienza cerca de los 60's cuando Monsanto instaló el primer sistema de control digital directo (DDC). A pesar de un gran número de exitosas instalaciones del sistema, en esa época, el DDC no cambió realmente al control analógico de su posición en el mercado, pues todavía existían dudas sobre su nivel de confiabilidad.

A principios de 1960, ya había una cantidad considerable de microcomputadoras, y la comparación económica entre los controladores analógicos y digitales no se hizo esperar, siendo favorable para los digitales, pero aún esto no se veía reflejado en las ventas. Posteriormente en 1970, aparecieron las microcomputadoras de tableros sencillos, con circuitos integrados a mediana escala (MSI). Éstas comenzaron a tener costos accesibles y atractivos con posibilidad de reemplazar a los controladores analógicos

Al mismo tiempo, el microprocesador digital, que utilizaba integración de circuitos a gran escala (LSI), apareció en escena. Estos microprocesadores alteraron la economía básica de los sistemas de control de procesos mediante la fabricación del sistema lógico digital con sus inherentes ventajas en confiabilidad, precisión y flexibilidad, costo competitivo con los sistemas analógicos en el contexto de la complejidad de la regulación de acciones de control en las industrias de procesos

## CONCEPTOS BÁSICOS DEL CONTROL DIGITAL DIRECTO.

En este tipo de control la computadora se hace cargo directamente de la adquisición de los datos, elaboración de las órdenes de control y de su envío a los actuadores. En este caso, la computadora es el corazón del loop de control, ejecutando los algoritmos y las estrategias establecidas. Las estrategias ya no están restringidas al PID, que llevaba a cabo el controlador analógico, ahora se puede disponer de muchos otros algoritmos e incluir toma de decisiones lógicas y correcciones complejas.

Se destacan dos tipos de componentes que aparecen en el loop de control por exigencia de la incorporación de la computadora dentro del loop: *los convertidores y los multiplexores*. Los primeros transforman las señales analógicas de los sensores en digitales para su manejo por la computadora y las digitales de ésta, en analógicas para el mando de motores y válvulas. Los multiplexores, de entrada y salida, permiten a la computadora repartir su potencia y su tiempo entre varios loops de control, conectando secuencialmente la computadora a los diferentes loops a su cargo. La figura 2.6 esquematiza el uso de un sistema digital aplicado a un loop de control.

## DESARROLLO HISTÓRICO DEL CONTROL DISTRIBUIDO.

Se tiene la creencia de que esta filosofía de control surge cuando la compañía Honeywell en 1969, empieza a investigar el concepto de loop de control digital simple (SLDC), concepto viable con la aparición de los microprocesadores, éste es el ingrediente esencial para esta nueva filosofía de control.

Algunos expertos objetan que el sistema de *control distribuido*, (desde ahora se conocerá

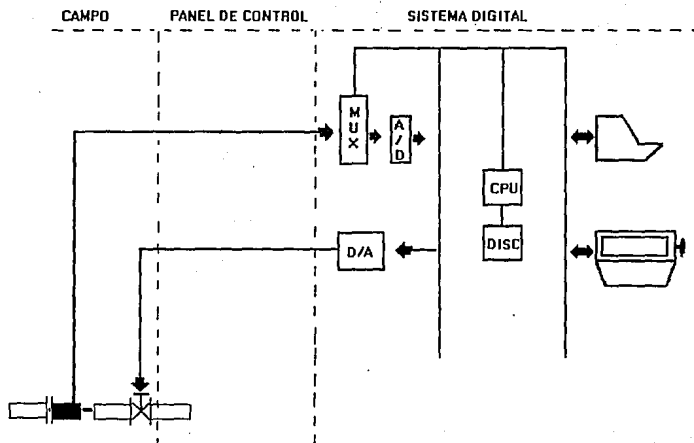


FIGURA 2.6 SISTEMA DIGITAL APLICADO A UN LOOP DE CONTROL.

como DCS), haya sido introducido hace poco tiempo, sin embargo, están de acuerdo en que Honeywell fué quien popularizó el control distribuido en 1974, mediante la introducción de su TDC-2000<sup>3</sup>, conjuntando un paquete de controladores para 8 loops, ello fué de especial significancia debido a que éste representaba un compromiso para los fabricantes de equipo de control de procesos del DCS, filosofía que involucraba una línea integral de productos específicos.

Este proyecto fue una alianza entre las compañías Honeywell y Exxon, resultando ampliamente beneficiadas ambas partes, pues Honeywell se aseguró financieramente al otorgar a sus clientes créditos a largo plazo al utilizar sus productos, en tanto la Exxon pudo adelantar sus estrategias secretas de control de procesos y alcanzó las metas esperadas al incorporarse al mayor desarrollo del DCS.

Las pruebas de campo del TDC-2000 iniciaron en 1975 en tres lugares, en el Imperial Oils Sarnia, refinería de Ontario, la prueba involucraba 16 loops de control de los cuales 8 eran loops en cascada en la planta refinadora. Estas pruebas fueron altamente exitosas y gracias a una compañía aliada al imperio de la Exxon, se logró instalar estos sistemas en al menos 3 lugares de Estados Unidos.

A fines de 1978, Honeywell había entregado varios cientos de sistemas TDC-2000 que involucraban más de 20 mil loops de control. Las mayores aplicaciones incluían plantas petroquímicas, refinerías y molidoras de pulpa. La gran inversión de este sistema con empleo de 4500 computadoras, lo situó dentro de un primer plano en el mercado, y obliga a Exxon a adquirir de manera continua el sistema. A pesar de lo anterior no se alcanzó el "estado de arte" en el sistema y algunas otras compañías ofrecen DCS's más baratos, fáciles de usar y de gran capacidad debido al gran avance de las computadoras en ese período, limitando el uso de las 4500 máquinas de control.

Posteriormente, surgen nuevos sistemas de control distribuido, debido a las necesidades en los diferentes tipos de procesos. Por ejemplo, aparece el TDC-3000 de Honeywell (no necesita director de proceso) y Bailey Network 90 para refinerías; algunos para procesos batch como el Rosemount System 3, el Texas Instruments D/3 y ABB Taylor Mod. 300, otros sistemas para procesos continuos como el Foxboro I/A, Moore Mycro II y Fisher Provox; y para plantas de potencia se diseñaron sistemas como el Westinghouse WDPF y Leeds & Northrup Max1.

A pesar de que tales sistemas se especializaron de acuerdo a diversas operaciones se considera a ninguno como el mejor o más eficiente. Actualmente se intenta llevar a cabo una estandarización que incluiría requerimientos de i/o, velocidad de proceso, gráficos, disciplina, estructuras discontinuas, mantenimiento y muchos otros más.

---

<sup>3</sup> Total Distributed Control.

## CONCEPTOS BÁSICOS DEL CONTROL DISTRIBUIDO.

El DCS se ha enraizado dentro de la práctica de control industrial, y ha favorecido el "estado de arte" en la construcción de nuevas plantas de proceso. Además el DCS representa el más grande adelanto en la tecnología del control de procesos, posiblemente la más importante desde la introducción del control feed-back analógico.

El control distribuido consiste en repartir los recursos de cálculo y control por todo el proceso, aproximándolos todo lo posible a los lugares donde se necesita. Sin embargo, estos recursos no deben de ser independientes y deben pasar información al lugar de mando general del proceso que estará encargado, además del almacenamiento general de la información, de la supervisión y coordinación general y de la comunicación con los centros de control de otros procesos u otras secciones del mismo. La red de comunicación entre los distintos recursos locales y la sala central de control es un elemento fundamental en este tipo de configuración. Las ventajas de una instalación de este tipo son innumerables: desde la ya indicada proximidad del control a los procesos, con esto se supone aumento de la flexibilidad, como el mismo aumento de la potencia del control, el incremento de la modularidad, la reducción de la complejidad del conjunto facilitando el diseño, la instalación, la puesta en marcha y el funcionamiento normal, la protección de las comunicaciones y la posibilidad de adoptar medidas de redundancia y actuaciones en caso de fallo, así como su reparación.

La figura 2.7 representa un esquema del sistema TDC-2000 implementado mediante la técnica digital.

### 2.3 TEORÍA DEL CONTROL AUTOMÁTICO.

## SISTEMAS GENERALES DE CONTROL FEEDBACK Y FEEDFORWARD.

El principal objetivo del control en una planta química es suprimir la influencia de disturbios externos sobre un proceso. Tales disturbios o variables de carga denotan el efecto de los alrededores (mundo externo) sobre las unidades de proceso y considera a estos efectos fuera del alcance del operador humano.

Los diferentes aspectos del control se comprenderán mejor si se describen con un ejemplo: Se tiene un tanque de calentamiento como el de la figura 2.8, en él entra un líquido a un flujo  $F_i$  y a una temperatura  $T_i$ , en donde es calentado con vapor.  $F$  y  $T$  son el flujo y la temperatura de la corriente de salida. El tanque es agitado, lo cual implica que la temperatura del efluente es igual a la temperatura del líquido en el tanque.

Los objetivos operacionales son:

1. Conservar la temperatura del efluente  $T$  a un valor deseado  $T_s$ .
2. Conservar el volumen del líquido en el tanque al valor deseado  $V_s$ .



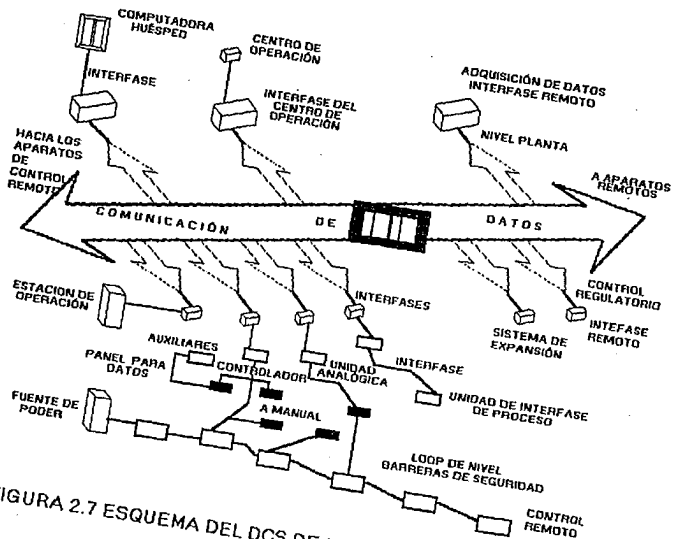


FIGURA 2.7 ESQUEMA DEL DCS DE HONEYWELL (TDC-2000).

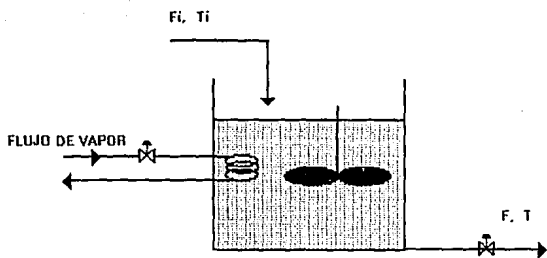


FIGURA 2.8 TANQUE DE CALENTAMIENTO

La operación del tanque es perturbada por factores externos, tales como la temperatura y el flujo de la corriente de alimentación. Si nada cambia, se tendría  $T=T_s$  y  $V=V_s$ , lo cual implica dejar solo el sistema, es decir sin supervisión o control. Pero es claro, que esto no siempre sucede, ya que  $F_i$  y  $T_i$  están sujetos a cambios frecuentes, como consecuencia, es necesaria alguna forma de control que alivie el impacto de estos disturbios y conserve a  $T$  y a  $V$  en el valor deseado.

En la figura 2.9 se representa una acción de control para conservar  $T=T_s$  cuando  $T_i$  o  $F_i$  cambia. Un termocople mide la temperatura  $T$  del liquido en el tanque, después  $T$  es comparada con el valor deseado o punto de ajuste  $T_s$ , obteniendo una desviación  $E = T_s - T$ . El valor de la desviación  $E$  es enviado al mecanismo de control, el cual decide qué hacer para que la temperatura regrese al valor deseado  $T_s$ . Si  $E > 0$ , implica que  $T < T_s$ , y por lo tanto el controlador abre la válvula de vapor para proveer más calor al sistema, por el contrario, el controlador cierra la válvula de vapor cuando  $E < 0$  ó  $T > T_s$ . Cuando  $T=T_s$  ( $E=0$ ) el controlador no actúa. A este sistema de control, que mide la variable de importancia directa (en este caso  $T$ ) después de que un disturbio tiene efecto sobre ella, se le conoce como sistema de control feedback. El valor deseado  $T_s$  es seleccionado externamente por una persona encargada de producción.

De una forma generalizada consideremos el proceso de la figura 2.10a con una salida  $y$ , un disturbio  $d$  (también conocido como carga del sistema) y una variable manipulable  $m$ . El disturbio  $d$  cambia de una manera impredecible, en este sentido es necesario controlar el proceso con el fin de conservar el valor de la salida en un valor deseado. La acción del control feedback se resume en los siguientes pasos:

1. Mide el valor de la salida (flujo, presión, nivel, temperatura o composición) usando los instrumentos apropiados. El valor  $Y_m$  se deja como valor indicado para el sensor.
2. Compara el valor indicado  $Y_m$  con el valor deseado  $Y_{sp}$  (setpoint) de la salida. Lo cual permite conocer la desviación (error)  $E=Y_{sp} - Y_m$ .
3. El valor de la desviación  $E$  es provisto al controlador principal. El controlador cambia el valor de la variable manipulable  $m$ , de tal forma que reduzca la magnitud de la desviación  $E$ . Generalmente el controlador no afecta a la variable manipulable directamente sino mediante otro aparato (generalmente una válvula de control) conocido como elemento final de control. La figura 2.10b resume gráficamente los 3 pasos.

El sistema en la figura 2.10a es conocido como *loop o circuito abierto*, en contraste con el sistema de control feedback de la figura 2.10b, designado como *circuito cerrado*. También, cuando cambia el valor de  $d$  o  $m$  la respuesta del primero es llamada respuesta de circuito abierto, mientras que la del segundo es nombrada respuesta de circuito cerrado. El término circuito cerrado es evidente de la figura 2.10b.

Los loops de control feedback nunca pueden lograr un control perfecto de los procesos químicos, esto es, conservar la salida del proceso continuamente al valor deseado de setpoint en

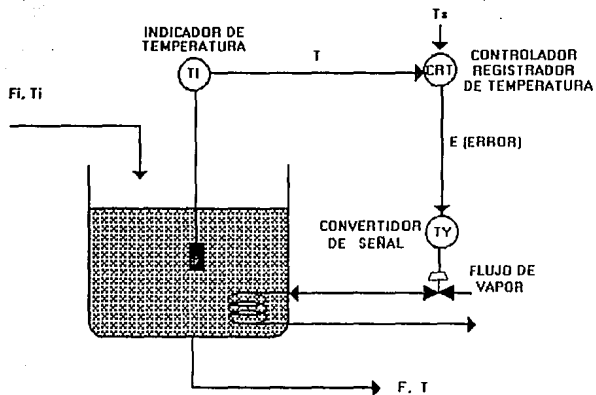
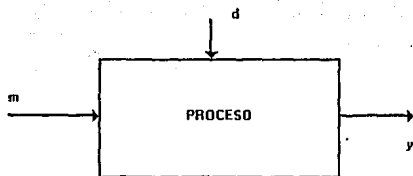
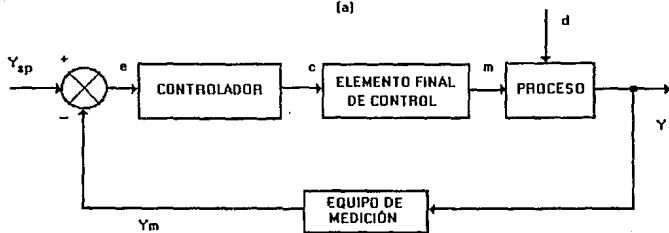


FIGURA 2.9 ACCION DE CONTROL PARA CONSERVAR LA TEMPERATURA.



(a)



(b)

FIGURA 2.10 (a) PROCESO Y (b) LOOP FEEDBACK

presencia de cambios en la carga. La razón es simple: un controlador feedback, reacciona sólo después de detectar una desviación del valor deseado del setpoint en el valor de la salida.

A diferencia de los sistemas feedback, la configuración de un *control feedforward* mide el disturbio (carga) directamente y toma la acción de control para eliminar éste impacto en la salida del proceso. Por lo tanto los controladores feedforward teóricamente tienen un alto potencial para el control perfecto.

Consideremos el tanque agitado mostrado en la figura 2.8. El objetivo del control es conservar la temperatura en el tanque a un valor deseado (setpoint) a pesar de algunos cambios en la temperatura de la corriente de entrada. Un sistema de control feedforward mide la temperatura de la corriente de entrada (disturbio) y ajusta apropiadamente la presión de vapor (variable manipulable). Así se incrementa la presión de vapor si la temperatura de entrada decrece, y decrece la presión de vapor si la temperatura de entrada aumenta.

En la figura 2.11 se presenta la forma general de un sistema de control feedforward. Este mide directamente el disturbio y anticipa el efecto que podría tener sobre la salida del proceso, subsecuentemente hay muchos cambios en la variable manipulable para eliminar completamente el disturbio sobre la salida del proceso (variable controlable). La acción del controlador empieza inmediatamente después de detectar el disturbio. Es claro que el feedback actúa después del hecho, de una manera compensatoria, mientras el feedforward actúa de una manera anticipatoria.

## CONTROL EN CASCADA.

Este tipo de control es una técnica que utiliza dos sistemas de medición y control para manipular un simple elemento final de control. Su propósito es proveer un incremento en la estabilidad a problemas particularmente más complejos de control de procesos.

El control en cascada se emplea cuando una propiedad de la variable de entrada al proceso (que no es sobre la que el controlador actúa), trabaja como perturbación de la salida. Veamos un ejemplo: se supone tener un tanque de reacción con producción de calor y hay que controlar su temperatura, se hace circular agua fría por una chaqueta envolvente del tanque. La regulación se hace midiendo la temperatura del baño y controlando el caudal del agua fría a la entrada de la chaqueta, tal y como aparece en la figura 2.12.

Es evidente que la temperatura del agua fría de entrada perturbará la temperatura del tanque que deseamos controlar, ya que para la misma necesidad de enfriamiento, y por lo tanto, el mismo caudal de agua fría, ésta enfriará según su misma temperatura. El control en cascada elimina esas perturbaciones, para eso utiliza dos controladores seguidos, la salida del controlador primario sirve de referencia para el secundario y cada controlador responde de un loop de control: el secundario, del loop más interno, tiene una dinámica más rápida, y el primario del loop más externo, que es el principal y posee una dinámica más lenta. El proceso queda también descompuesto en dos bloques unidos en serie representando los dos efectos que tienen lugar. En la figura 2.13 puede verse un

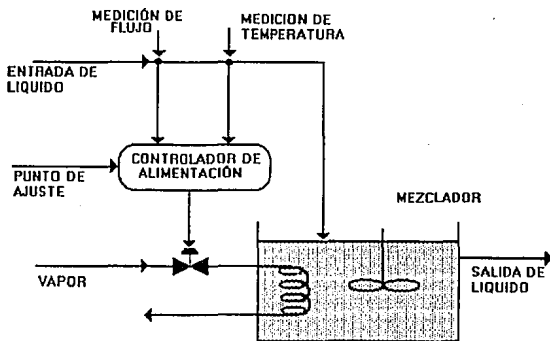


FIGURA 2.11 CONTROL DE ALIMENTACIÓN FEEDBACK DE PROCESO DE INTERCAMBIO DE CALOR.

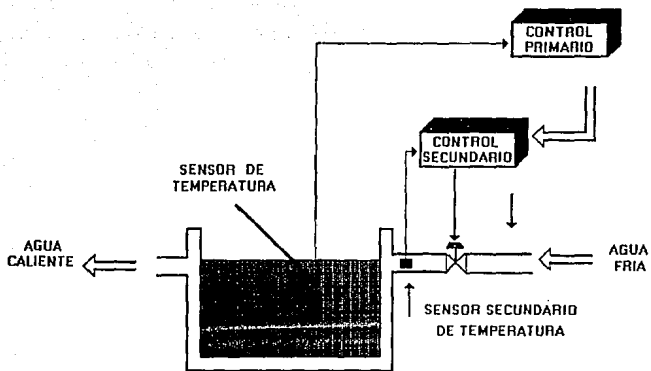


FIGURA 2.12 CONTROL EN CASCADA PARA LA TEMPERATURA DE UN BAÑO.



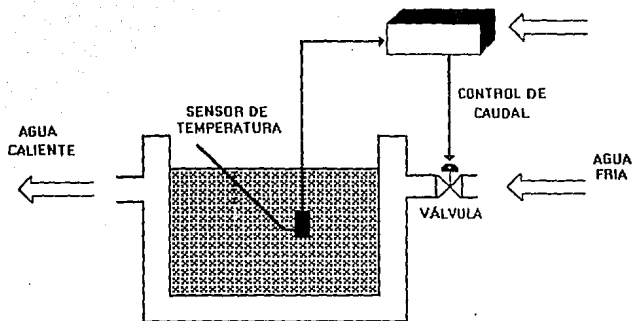


FIGURA 2.13 CONTROL DE TEMPERATURA DE UN BAÑO.

diagrama de bloques de una configuración en cascada y en la figura 2.14 cómo se traduciría ésta para el ejemplo de la figura 2.12.

Para el ajuste de los controladores se procede del interior al exterior, se analiza el loop interno solo y se ajusta el controlador interno que normalmente es suficiente con un proporcional, o un PI si la ganancia es pequeña, debido a que los errores estacionarios serán corregidos por el controlador primario. Se reduce el loop interno, con el controlador secundario, a un solo bloque y se analiza el loop exterior ajustando de forma independiente el controlador primario.

## TIPOS DE CONTROLADORES.

Toda la teoría de control automático gira alrededor del diseño del controlador apropiado a cada proceso, dependiendo del modelo utilizado y de las exigencias del funcionamiento impuestas, así como también, de la realización de dicho controlador. Éste representa la lógica de actuación sobre el proceso, la función del comportamiento de este último, o mejor, de la desviación de su comportamiento real respecto del deseado, tiene por tanto como entrada, el error existente en el comportamiento del sistema, y, como salida, la actuación que debe ejercerse sobre el proceso.

Debido a la rama necesaria para el control automático, puede presentarse el fenómeno indeseable de inestabilidad, o pueden aparecer oscilaciones en el comportamiento del proceso. Se dice que un proceso es estable cuando para entradas, con valores dentro de unos límites, las salidas también se mantienen dentro de otros límites. Si introducimos una señal finita de entrada, dentro de unos límites aceptables, y se comporta con tendencia a aumentar continuamente su salida, sin límite, el proceso es inestable. Los procesos cuyo modelo es lineal, si son estables en unas circunstancias, lo son en todas, no dependiendo de la señal que se les introduzca. No ocurre lo mismo con los procesos no lineales, que pueden ser estables para unos determinados valores de la entrada pero dejar de serlo para valores mayores.

Una forma especial de inestabilidad son las oscilaciones. Pueden amortiguarse rápida o lentamente, o incluso, no ser amortiguadas y crecer en amplitud indefinidamente. El controlador tiene por misión eliminar o reducir los disturbios que se presenten en los procesos, sin embargo el empleo de la realimentación puede hacer que un controlador de operación estable, dé lugar a un sistema de comportamiento inestable.

La estrategia normalmente empleada en los controladores es llevar el error a cero lo antes posible y sin oscilaciones, tanto si es debido a perturbaciones, como a variaciones en la carga o a cambios en la consigna. En la industria, los controladores más usados han sido los on/off (válvulas de dos posiciones, por ejemplo) y los basados en las acciones: proporcional, integral y derivadora, debido a que con ellos se conseguía un funcionamiento aceptable en la mayor parte de los procesos (una mejora sustancial respecto al control manual, tanto en funcionamiento como en calidad de producto), y porque se consiguió construirlos con las tecnologías existentes en cada época, aunque hasta hace muy poco sólo existían los de tipo analógico.

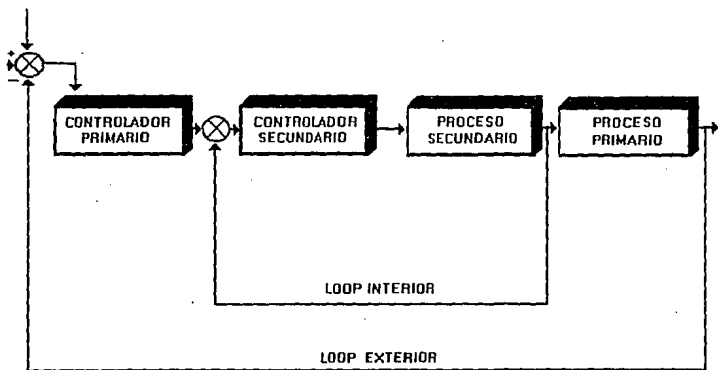


FIGURA 2.14 ESQUEMA DE UNA ESTRUCTURA EN CASCADA.

Entre el dispositivo de medida y el elemento final de control se encuentra el controlador (figura 2.10b). Su función es recibir la señal de salida  $y_m(t)$  y mantenerla en el valor deseado; sin embargo la entrada al controlador es el error  $E(t)$  mientras que la salida es  $c(t)$ . Los tipos o modos de control difieren en la forma de relacionar  $E(t)$  con  $c(t)$ .

La señal de salida del controlador depende de su construcción y puede ser una señal neumática (aire comprimido) o una señal eléctrica.

## CONTROL PROPORCIONAL, INTEGRAL Y DERIVATIVO.

La señal actuante de salida es proporcional a la entrada o al error:

$$C(t) = K_c E(t) + C_s$$

En donde  $K_c$  = ganancia proporcional del controlador y su valor se puede fijar de acuerdo con las necesidades del control del proceso y  $C_s$  = señal de referencia del controlador ( $E=0$ ).

Un *controlador proporcional* se describe por el valor de su ganancia proporcional  $K_c$  o equivalentemente por su banda proporcional PB, donde  $PB=100/K_c$ . La banda proporcional caracteriza el rango sobre el cual el error debe cambiar para manejar la señal actuante del controlador sobre el rango de:

$$1 \leq PB \leq 500$$

Para un controlador con grandes ganancias o valores muy grandes de  $K_c$ , o bien valores muy pequeños de su banda proporcional, sería más alta la sensibilidad de la señal actuante del controlador a la desviación E

Se trata de un control muy sencillo, estable y fácil de ajustar, pero plantea el problema de que si aparece un error estacionario, no es capaz de eliminarlo. Para eliminar un error de este tipo se emplea el *control integral* cuya señal de respuesta es proporcional no al error, sino a la integral de éste. La constante de proporcionalidad que se toma es  $1/T_i$ , llamándose  $T_i$  constante de integración. Este tipo de acción de control tiene una respuesta lenta. Para conseguir una respuesta rápida a las variaciones, se emplea el *control derivativo*, en el que la señal de salida es proporcional a la derivada del error y por lo tanto proporcional a su variación. La constante de proporcionalidad  $T_d$  se conoce como constante de derivación.

En la práctica los controles integral y derivador no se suelen emplear solos, sino unidos al proporcional.

La función de transferencia para el controlador proporcional es:

$$G(s) = K_c$$

## CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL Y PROPORCIONAL DERIVATIVO.

El *control proporcional integral (PI)* tiene una salida suma de dos términos, uno proporcional al error y el otro proporcional a la integral del error. Por lo tanto han de fijarse dos parámetros,  $K$  y  $T_I$ . Este tipo de control elimina el error estacionario y tiene mejor respuesta dinámica que el control integral sólo, pero debido al término integral, puede producir inestabilidad en el sistema.

La señal actuante de este controlador esta relacionada con el error por la siguiente ecuación:

$$C(t) = K_c E(t) + K_c/T_I \int E(t) dt + C_s$$

en donde  $T_I$  = constante integral de tiempo o tiempo de reajuste (minutos). El tiempo de reajuste es un parámetro ajustable y algunas veces se le conoce como minutos por repetición. Generalmente éste varia en un rango de 0.1 a 50 minutos.

Algunos fabricantes calibran sus controladores en términos de  $1/T_I$  (repeticiones por minuto), el cual es conocido como relación de reajuste. La acción integral de este tipo de control hace que la señal actuante cambie o exista mientras el error exista, de esta manera el controlador puede eliminar pequeños errores. La ecuación de transferencia para un controlador PI es:

$$G_c(s) = K_c [1 + (1/T_I)s]$$

El *control proporcional derivativo (PD)* tiene una salida suma de dos términos uno proporcional al error y otro a su derivada, tiene las ventajas de ser estable, dar menor error estacionario que el control proporcional sólo (aunque no lo elimina) y ofrecer una rápida respuesta.

## CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO.

El tipo de control más empleado en los controladores industriales es el control proporcional integral derivativo (PID), compuesto de los tres tipos de acciones, su salida es la suma de tres términos: uno proporcional al error, otro a la integral del error y el tercero a la derivada del error.

La expresión que relaciona a la salida del control con el error esta dada por:

$$C(t) = K_c E(t) + K_c/T_I \int E(t) dt + C_s + K_c T_D dE/dt$$

Donde:

$T_D$  = constante de tiempo derivativo (minutos).

Con la presencia del término  $dE/dt$  el controlador (PID) anticipa que el error estará en un futuro inmediato y aplica la acción de control, la cual es proporcional a la relación de cambio en el

error. Esta acción de control también se le conoce como control anticipatorio. La acción derivativa tiene el efecto de reducir o detener la desviación del punto de ajuste que ocurre frecuentemente cuando se añade la acción integral a la acción proporcional. La acción derivativa también contrarresta la característica de retraso introducida por la acción integral.

La función de transferencia para un controlador PID es:

$$G_c(s) = K_c [1 + (1/T_I)s + T_Ds]$$

El controlador PID es el mejor de todos cuando está bien ajustado, es decir, si los valores de los parámetros  $K_c$ ,  $T_I$  y  $T_D$  (ganancia, constante de integración y constante de derivación respectivamente) son los más apropiados al proceso y al control deseado, proporciona una respuesta rápida y a la vez, elimina el error estacionario, sin embargo, al ser más complejo, es también más difícil de ajustar. Existen métodos de aproximaciones sucesivas para ajustar o sintonizar los parámetros de un controlador PID sobre un proceso de dinámica complicada que no se conoce bien aplicándose hasta lograr la respuesta adecuada.

## PROBLEMAS DE CONTROL.

Todos los procesos y dispositivos físicos tienen capacidad de almacenamiento de energía y son resistentes al cambio. En este aspecto son similares y pueden ser comparados a las propiedades eléctricas de capacitancia y resistencia<sup>6</sup>. Así como en un circuito eléctrico en el cual la salida es distorsionada con respecto a la entrada, la respuesta de un proceso respecto al cambio en algún parámetro, es probable que muestre una perturbación en algún grado. Esta perturbación se llama *retraso*.

Hay tres amplias clasificaciones de retrasos inherentes en sistemas de control de procesos: retrasos de procesos, retrasos de medición y retrasos de transmisión.

### *Retrasos de procesos.*

Estos resultan de la incapacidad de un proceso para aceptar o ceder energía instantáneamente. A veces son llamados retrasos de distancia-velocidad o tiempo muerto. Por ejemplo, el tiempo requerido para que el calor sea transferido de una corriente de proceso a otra para producir un cambio en la temperatura, es función de la velocidad, distancia y capacidad.

---

<sup>6</sup>Capacitancia. Es el cambio en cantidad contenida por unidad de cambio en una variable de referencia. Se mide en unidades de cantidad divididas por la variable de referencia.

Resistencia. Es la oposición al flujo de materia o de energía. Se mide en unidades de cambio de potencial necesarias para producir un cambio unitario en flujo.

### *Retrasos de medición.*

En mediciones físicas tales como el caso de la temperatura, por ejemplo, el retraso en la medición es debido a las capacidades térmicas del equipo, del elemento depósito de temperatura y del elemento de medición mismo. Es necesario calentar o enfriar los metales del intercambiador y del termocople antes de que el termocople pueda responder totalmente a un cambio de paso en temperatura. En un sistema lleno, el líquido o vapor deben ser calentados o enfriados antes de apreciar un cambio.

Los fuelles, espirales, Bourdons o diafragmas deben moverse antes de que un instrumento pueda detectar un cambio en la presión o en la presión diferencial, en estas mediciones se debe vencer la inercia física y mecánica.

En muchas mediciones analíticas, primero las muestras deben ser tomadas y acondicionadas antes de que un analizador pueda detectar cambios de composición. Debido a la naturaleza de estas mediciones a veces se encuentran retrasos de varios minutos.

### *Retrasos de transmisión.*

Estos retrasos son más notorios en sistemas neumáticos que en sistemas electrónicos.

Un sistema de control neumático típico puede tener un detector localizado a unos 300 ft del cuarto de control. Un valor de la variable medida es transmitido a 300 ft hacia el controlador para compararlo con su valor deseado (setpoint). Después que el controlador responde a la información, su señal correctiva viaja aproximadamente 300 pies (ft) de regreso a un regulador (probablemente una válvula de control) la cual manipula la variable. Si el actuador de la válvula es grande, un considerable volumen debe ser llenado para reflejar la diferencia entre el valor de la señal antiguo y el corregido. Generalmente el tiempo es de unos cuantos segundos, pero a veces es bastante para procesos que actúan muy rápido.

## 2.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS SISTEMAS DE CONTROL.

		MANUAL	ANALÓGICO	DIGITAL	DCS
PRECISIÓN DE MEDICIÓN	ALTA MEDIA BAJA	X	X	X	X
DEPENDENCIA DEL OPERADOR	ALTA MEDIA BAJA	X	X	X	X
EL ALGORITMO DE CONTROL SE APLICA	FÁCIL  DIFÍCIL	X	X	X	X
TIPO DE RESPUESTA DEL CONTROL	RÁPIDA MEDIA LENTA PRECISA NO PRECISA	X X	X X	X X	X X
TRASFERENCIA DE CONTROL MANUAL A AUTOMÁTICO	SI  NO	X	X	X	X
COSTO DE INGENIERÍA E INSTALACIÓN <sup>7</sup>	MUY ALTO ALTO	X	X	X	X

Como se puede apreciar en la tabla anterior, el control manual posee pocas ventajas dadas las limitaciones técnicas en el tiempo en que éste fue usado, por el contrario las desventajas son bastantes, se pueden enunciar la pobre repetibilidad (repetición continua de la estrategia de control), la utilización de un gran número de operadores y la gran dificultad de evaluar simultáneamente las variables para aplicar una estrategia de producción dada.

<sup>7</sup> Los niveles de comparación que aparecen en esta tabla, están en base a una planta petroquímica que maneja 2500 loops con un costo de desarrollo de ingeniería, adaptación y entrenamiento de NS 1000 aproximadamente por punto (loop controlado). Es conveniente señalar que intervienen en el costo no sólo la naturaleza y el tamaño de la planta sino también el número de dispositivos, el tipo de variables a controlar, la redundancia del DCS y el tipo de comunicación elegida para operar.



Posteriormente la técnica analógica mejora favorablemente el control de los procesos incorporando equipo montable que permite evaluar al proceso mediante sus variables de forma simultánea, además de mejorar la repetibilidad de las acciones de control; pero adolece de la precisión de los modernos sistemas de control y de su velocidad de repuesta.

Por otra parte el control digital directo, proporciona todas las ventajas para aumentar la productividad<sup>8</sup> de un ligero porcentaje hasta valores muy altos, pues el sistema puede evaluar e incluso emitir decisiones a nivel de áreas parciales o totales del proceso a través de él mismo utilizando su respaldo según la filosofía usada

Actualmente los sistemas de control distribuido (DCS) comparados con los sistemas de control convencionales presentan una serie de ventajas resumidas de la siguiente forma:

- Instalación y montaje más simple.
- Operación más sencilla y segura.
- Facilidad para el cambio de estrategias de control mediante la modificación de parámetros y algoritmos.
- Configuración muy flexible de las presentaciones.
- Mejor respuesta a alteraciones del proceso.
- Mayor facilidad en la adquisición de datos.
- Fácil actualización mediante el software.
- Posibilidad de redundancia total (comunicación repetida entre todos los aparatos y periféricos del sistema con el fin de aumentar la confiabilidad).
- Posibilidad de ampliación hacia niveles jerárquicos más altos.
- Capacidad de autodiagnóstico y localización de averías.
- Posibilidad de conexión hacia sistemas expertos.
- Fácil almacenamiento de información.

Debemos recalcar que un DCS incrementa su eficiencia al utilizar sensores inteligentes para completar la optimización del sistema de control con las siguientes ventajas:

- Fácil mantenimiento debido a la ausencia de partes mecánicas.
- Calibración desde la sala de control.
- Comunicación por señales digitalizadas desde el propio sensor.
- Posibilidad de utilización de la fibra óptica y por lo tanto mejora la protección contra interferencias.

Desde el punto de vista de explotación y finalmente para resumir el capítulo, un DCS contribuye a aumentar la producción, la calidad del producto, la seguridad de la operación y la continuidad del proceso (disminución de paros accidentales). También favorece el mantenimiento de la uniformidad de los estándares de calidad. Por otra parte permite optimizar el consumo de

---

<sup>8</sup> La productividad esta referida, a la mejora de la calidad de los productos, al volumen de producción y sobre todo a la reducción de costos por operación.

## CAPÍTULO III. INSTRUMENTACION Y CONTROL DE PROCESOS.

En este capítulo se pretende establecer las bases para instrumentar los equipos necesarios en el proceso de producción de acetona de Kellogg Co.. Las soluciones propuestas a los problemas que representa la instrumentación de equipos no pretenden de ninguna manera cubrir el total de formas de resolver el problema, sino, únicamente reflejan la preferencia particular por alguna o algunas de ellas.

### 3.1 FILOSOFÍAS DE CONTROL DE REACTORES.

#### PRINCIPIOS GENERALES.

Todos los procesos químicos giran en torno a un reactor químico, y éstos se utilizan a nivel industrial en una gran variedad de diseños, tienen una relación específica con el tipo de reacción; de acuerdo a su mecanismo (irreversible, reversible, simultánea o consecutiva), a su molecularidad (unimolecular o bimolecular), al orden de reacción (orden integral, como primer y segundo orden, y orden fraccional u orden cero), a las condiciones de operación (isotérmicas, adiabáticas, no isotérmicas y no adiabáticas) y a las fases involucradas. También depende de la necesidad de un catalizador y de la capacidad de producción; siendo todas éstas las más importantes.

De acuerdo a la información anterior es posible clasificar a los reactores en los siguientes tipos: tanque agitado, en batería, tubular sencillo, multitubular, lecho fluidizado y lecho fijo de sólidos.

Para propósitos prácticos nos limitaremos a los del tipo tanque agitado, tanto para procesos en lotes como continuos.

*Reactor continuo.* Un reactor continuo (CSTR) es un recipiente que continuamente es alimentado y consecuentemente de forma continua el producto es retirado. Mediante agitación continua se busca el mezclado óptimo.

*Reactor batch (intermitente).* Un reactor tipo batch es un recipiente normalmente agitado, es cargado al inicio del proceso y descargado hasta que la reacción ha sido consumada.

Podría pensarse en principio que lo más recomendable es usar reactores del tipo continuo, pues es en realidad la tendencia de la industria química por todas las ventajas ya conocidas, sin embargo, cuando el proceso involucra varias reacciones sucesivas, o cuando la producción es relativamente pequeña (caso de la industria farmacéutica), o cuando el manejo de los materiales es crítico haciéndolo de forma continua, se hace necesario el uso de un reactor batch.

#### NECESIDADES DE CONTROL.

Un sistema de control que presente oscilaciones indeseables, puede arruinar el producto,

eliminar el catalizador, dañar el propio reactor e incluso atentar contra la integridad de los operadores; no es posible pues, trabajar con sistemas de control pobremente diseñados. También es digno de puntualizar que siendo los reactores el origen de muchos procesos, lo cual los pone a salvo de cambios de carga rápidos e impredecibles, serán el factor que fije la capacidad de la planta y consecuentemente los disturbios presentados se propagarán por toda ella.

## FILOSOFÍAS DE CONTROL PARA REACTORES BATCH.

No obligadamente se deben controlar los reactores en función de la temperatura, pero por ser ésta la variable comúnmente la más representativa del problema, nos limitaremos a mencionar algunos prototipos. La figura 3.1 muestra una serie de ejemplos: en el caso a) agua de enfriamiento fluye a través de un serpentín interno en el reactor, en b) el medio de enfriamiento fluye en una chaqueta externa, en c) un sistema de rango compartido es presentado para aquellos casos en los cuales es necesario adicionar calor al inicio de la reacción, en d) un sistema en cascada, tal vez sea el más ejemplar, se usa para eliminar los problemas dinámicos (retrasos), e) este sistema, también en cascada, permite ahorrar agente de control, si bien introduce un retraso adicional debido a un intercambiador, f) aquí se tiene una sofisticación, un sistema con válvulas en rango compartido, una de ellas en by-pass, el cual permite un control más rápido, g) con el fin de eliminar la chaqueta, es posible usar un sistema como éste, se tendrá una gran área de transferencia pero será fundamental poder contar con una alta velocidad en la recirculación. En h) se presenta un sistema autoenfriado, se supone que la reacción se lleva a cabo en plena ebullición, el vapor generado puede ser enfriado y retornado como condensado (incluso por gravedad); esto permite tener una transferencia de calor rapidísima, en i) se tiene un sistema que permite usar un reactor batch de forma semicontinua, el reactivo será adicionado mientras el enfriamiento sea bueno, finalmente en j) se observa una cascada temperatura-presión, usada cuando se desea mayor rapidez pues es más rápido detectar cambios de presión que cambios de temperatura, es obvio que éste sólo servirá en reactores cerrados.

Todos los sistemas presentados hasta aquí son útiles en procesos que liberan calor al efectuarse, es decir exotérmicos, pero la mayoría de ellos son válidos para los casos endotérmicos (requieren adición de calor para desarrollarse) cambiando simplemente el agente de control, un medio de calentamiento en vez de uno de enfriamiento.

## FILOSOFÍAS DE CONTROL PARA REACTORES CONTINUOS.

Muchos reactores continuos se controlan con sistemas semejantes a los vistos en el punto anterior, en vista de ello no se ofrecerá esta información; se presentarán, en este caso un par de aplicaciones con mayor complejidad, en espera de ampliar el horizonte en este campo.

La figura 3.2 presenta un sistema de control aparentemente muy complejo, sin embargo, se justifica plenamente; como puede observarse el control de pH es fundamental en este circuito de control, pero el pH es una función totalmente no lineal, debido a su naturaleza logarítmica. Así, introduce un grado de dificultad mayor al control que es posible resolver con sistemas como el presentado.

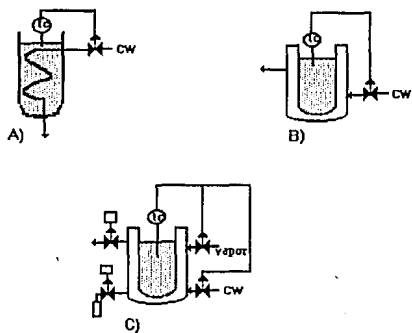


FIGURA 3.1 (A), (B) Y (C) SISTEMAS DE REACTORES BATCH.

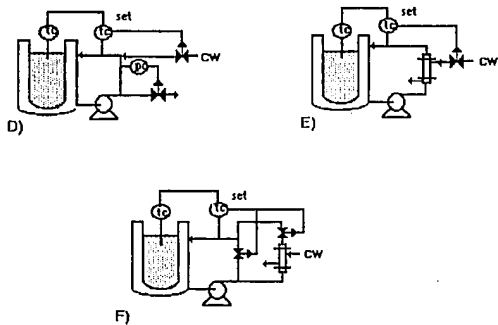


FIGURA 3.1 (D). (E) Y (F) SISTEMAS DE REACTORES BATCH.

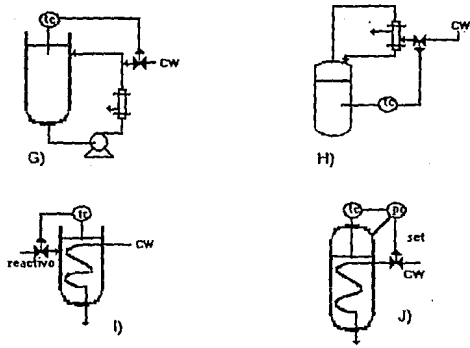


FIGURA 3.1 (G), (H), (I) Y (J) SISTEMAS DE REACTORES BATCH.

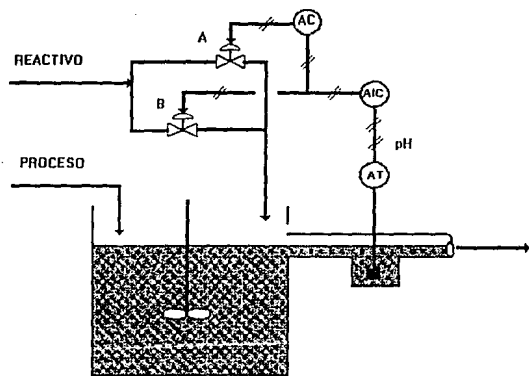


FIGURA 3.2 SISTEMA DE CONTROL DE pH

Se pretende solucionar la no-linearidad inherente del pH usando válvulas de diferente característica y que operen en secuencia. La válvula B será pequeña y de igual porcentaje y está operada directamente por un controlador proporcional puro, este controlador también operará una válvula A grande y lineal, pero lo hará a través de un control proporcional con reajuste automático y con una zona muerta de límites ajustables.

Recuérdese que las válvulas de igual porcentaje presentan un comportamiento exponencial, similar al del pH. Cuando el pH se desvía de la neutralidad, la ganancia de la curva tiende a decrecer, pero justamente esta desviación abrirá aún más la válvula, incrementando la ganancia de la válvula en sentido compensatorio. Sin embargo, la compensación sólo puede sostenerse si la relación entre posición de válvula y pH es fija; ésto justifica la eliminación del reajuste automático del primer controlador, pues éste trataría de eliminar cualquier desviación sin tomar en cuenta qué posición de válvula es requerida. Como la válvula de igual porcentaje es pequeña, el controlador proporcional la lleva, en un momento dado, a alguno de sus extremos, consecuentemente la zona muerta del controlador de dos modos es excedida. Es en ese momento que la válvula A es sostenida en su última posición, de esta manera la no-linearidad del pH es compensada hasta cualquier punto por la zona muerta.

La figura 3.3 ejemplifica un sistema que combina el control con retroalimentación (feedback) y el control anticipatorio (feedforward). Podemos observar que el sistema tratará de alimentar tanto reactivo como el fluido de proceso demande, esto sucede de forma inmediata en la trayectoria del feed-forward, pero como otros factores no medidos, pueden influir (ejemplo: las concentraciones de reactivos o del fluido de proceso) será necesario supervisar si el trabajo está bien hecho, la medición de pH hará esta función, es la trayectoria feedback y el relevador de multiplicación hará la función de coordinador de ambas trayectorias.

Se pueden mencionar una multitud de ejemplos con gran cantidad de variantes, pero se caería en casos muy particulares que no podrían incluirse en este trabajo.

### 3.2 FILOSOFÍAS DE CONTROL PARA COLUMNAS DE DESTILACIÓN.

#### PRINCIPIOS GENERALES.

En una *torre de destilación* se lleva a cabo un proceso de separación que utiliza fases de vapor y líquido, esencialmente a la misma temperatura y presión, para las zonas coexistentes. Se usan varios tipos de dispositivos denominados *platos* o *bandejas* (o también *charolas*) para poner a las dos fases en contacto íntimo. Las bandejas se apilan unas sobre otras y se encierran en una cubierta cilíndrica, para formar una columna. El material de alimentación que se debe separar en fracciones se introduce a uno o más puntos a lo largo de la coraza de la columna. Debido a la diferencia de gravedad entre la fase vapor y la líquida, el líquido corre hacia abajo de la columna, cayendo en cascada de plato en plato, mientras que el vapor asciende por la columna, para entrar en contacto con el líquido en cada uno de los platos.



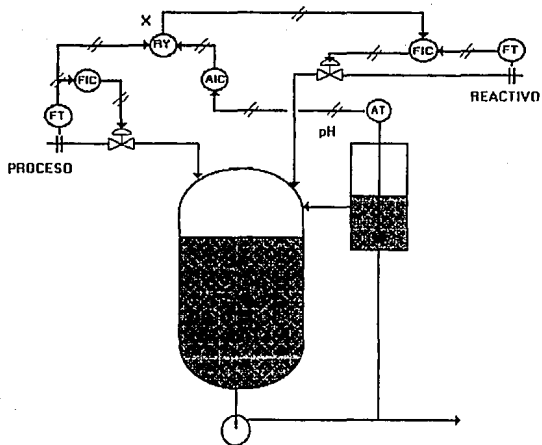


FIGURA 3.3 CONTROL FEEDBACK Y FEEDFORWARD

El líquido que llega al fondo de la columna se vaporiza parcialmente en un rehervidor calentado para proporcionar vapor rehervido que asciende por la columna. El resto del líquido se retira como producto del fondo. El vapor llega a la parte superior de la columna se enfría y condensa como líquido en el condensador superior; parte de éste líquido regresa a la columna como reflujo, para proporcionar un derrame líquido. El resto de la columna superior se retira como producto destilado (ver figura 3.4).

### NECESIDADES DE CONTROL.

Los costos actuales de energéticos han hecho una necesidad el reducir el consumo de vapor o aceite caliente en los reboilers de las columnas, y reducir el consumo de refrigerante en el condensador de los vapores saliendo por la parte superior de la columna.

Por otra parte, las columnas inestables, tienen costos de operación mayores. La inestabilidad de las columnas puede ser causada por diversas razones, como:

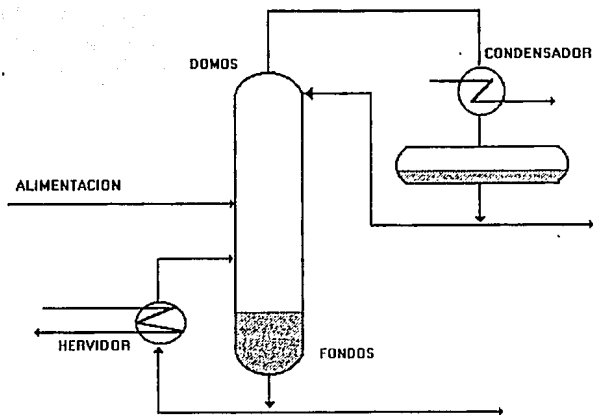
- Diseño inadecuado de los loops de control
- Diseño incompleto, etc.

Los principales factores causantes de la oscilación de una columna de destilación, son los disturbios que entran en la columna. Hay una gran necesidad de tener un mejor control para minimizar los efectos que los disturbios causan en la columna. Los disturbios más comunes de entrada en la columna son:

1. Cambios en el flujo de alimentación
2. Cambios en la composición de alimentación
3. Cambios en el medio ambiente
4. Cambios de los vapores interconectados, provenientes de otras unidades

Un problema aparecido en algunas industrias, es la necesidad de maximizar el rendimiento de la columna; obviamente es económicamente deseable operar una columna a su máximo rendimiento por implementación de un mejor control, que construir una unidad adicional para manejar una capacidad adicional requerida.

Realmente el obtener una máxima utilidad es la suma de las necesidades antes mencionadas y justifica el uso de su mejor control. La implementación de los controles antes discutidos no darán por ellos mismos un máximo de utilidad, pero darán definitivamente un mejor rendimiento. El máximo rendimiento vendrá de la implementación de algoritmos de control para optimización, los cuales han sido diseñados especialmente para una columna determinada o para un complejo, con una o varias columnas.



**FIGURA 3.4 COLUMNA DE DESTILACIÓN CON UNA ALIMENTACIÓN, UN CONDENSADOR TOTAL Y HERVIDOR**

## FILOSOFÍAS DE CONTROL.

Dos grandes filosofías de control han sido ampliamente usadas para el control de las columnas de destilación:

1. Control de balance de energía o control indirecto del balance de material
2. Control del balance directo de material

**1. CONTROL DE BALANCE DE ENERGÍA.** Este es un concepto de control, en el cual, una corriente de energía es ajustada para mantener controlada la calidad del producto. Puede ser:

- a) Flujo de vapor al hervidor
- b) Reflujo de la torre de destilación

El control de balance de energía ha sido el sistema de control tradicional. A continuación se presentan 2 ejemplos en donde la temperatura es la variable a controlar para mantener la separación deseada. Si la temperatura es constante en el punto seleccionado de la torre de destilación, se mantiene la separación a pesar de las variaciones en el flujo y en la composición de la alimentación.

En la figura 3.5 el control se logra de la siguiente manera:

1. El controlador de temperatura ajusta el reflujo de la torre de destilación
2. La válvula de control de destilado es manipulada por el controlador de nivel del condensador de la torre
3. El flujo de vapor al hervidor se mantiene constante por medio de un control de flujo
4. La válvula de control de los productos del fondo es manipulada por el control de nivel de la columna
5. El flujo de alimentación a la torre, se mantiene constante por medio de un controlador de flujo
6. La presión de la columna se mantiene constante por cualquiera de los diferentes métodos existentes y cuya selección depende principalmente de:

- a) presencia o no presencia de incondensables en el destilado
- b) tipo de condensador
- c) localización del condensador

Para no hacer más complicado el diagrama, no se muestra el sistema de control de presión, sin embargo aparece en la figura 3.6.

En el otro ejemplo, el sistema de control es el siguiente:

1. El controlador de temperatura y el flujo de vapor al hervidor, se encuentran en cascada. El punto de ajuste del controlador de flujo es fijado en forma remota por la salida del controlador de temperatura.

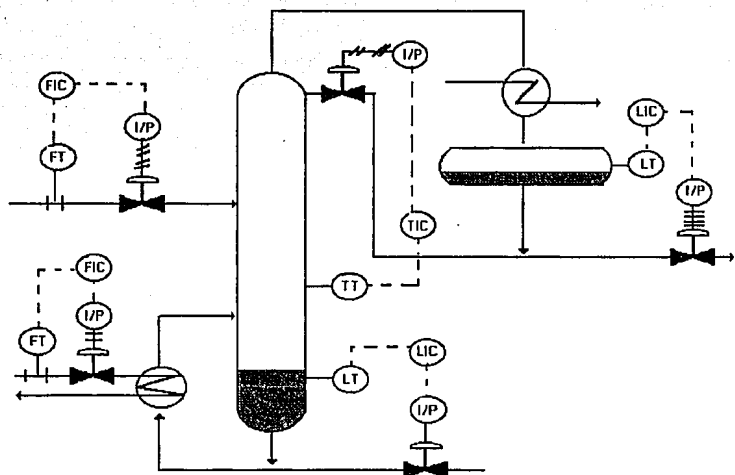


FIGURA 3.5 CONTROL POR BALANCE DE ENERGÍA EN UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN.

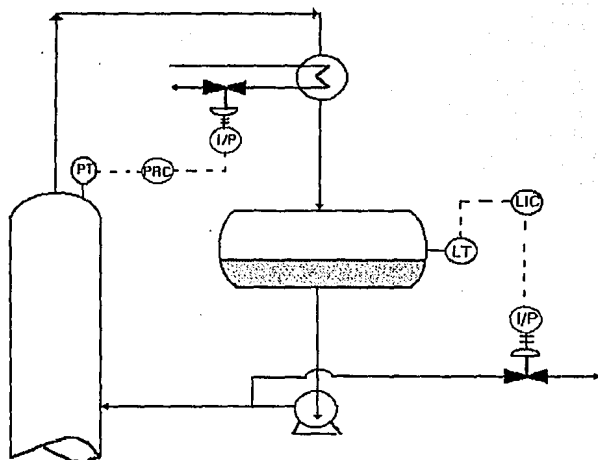


FIGURA 3.6 PRESIÓN CONSTANTE DE LA COLUMNA.

2. La válvula de control del destilado, es manipulada por el control de nivel del condensador de la torre.
3. El reflujo se mantiene por medio de un controlador de flujo.
4. La válvula de control de los productos del fondo, es manipulada por el control de la columna.
5. El flujo de alimentación a la torre, se mantiene constante por medio de un control de flujo.
6. La presión en la columna se mantiene constante.

**2. CONTROL DIRECTO DEL BALANCE DE MATERIAL.** Es un concepto de control, en el cual un flujo de algún producto saliendo de la columna, es manipulado para mantener controlada la calidad del producto. Las corrientes cuyos flujos pueden ser manipulados son:

- a) Destilado
- b) Producto del fondo
- c) Alguna salida lateral

La figura 3.7, es un ejemplo de la aplicación del concepto de control directo de balance de material, en el cual:

1. El controlador de temperatura en la torre, manipula el flujo de destilado para mantener la composición deseada.
2. El flujo de vapor al hervidor se mantiene constante por medio de un controlador de flujo.
3. La válvula de control de los productos del fondo, es manipulada por el control de nivel de la columna.
4. El flujo de alimentación de la torre, se mantiene constante por medio de un controlador de flujo.
5. El reflujo se controla por medio del control de nivel del acumulador.
6. La presión se mantiene constante.

Actualmente la filosofía de control que mayor estabilidad proporciona a las columnas de destilación es "el control directo de balance de material" el cual combinado con las técnicas avanzadas de control<sup>1</sup>, logra un nivel de estabilización tal, que es posible aplicar estrategias de optimización con buenos resultados.

### 3.3 FILOSOFÍAS DE CONTROL PARA COMPRESORES CENTRÍFUGOS.

#### PRINCIPIOS GENERALES.

Los *compresores centrífugos* también se conocen como turbosopladores y se utilizan para el manejo de grandes volúmenes de gases con elevaciones de presión de 0,5 hasta varios centenares de lb/pulg<sup>2</sup>. Para presiones por debajo de 0,5 lb/pulg<sup>2</sup>, se escoge por lo común uno de los diversos tipos.

---

<sup>1</sup> Técnicas avanzadas de control aplicadas a la destilación: Feedforward, Máxima separación, Control de composición de dos productos y el Control de dos productos con salida lateral.

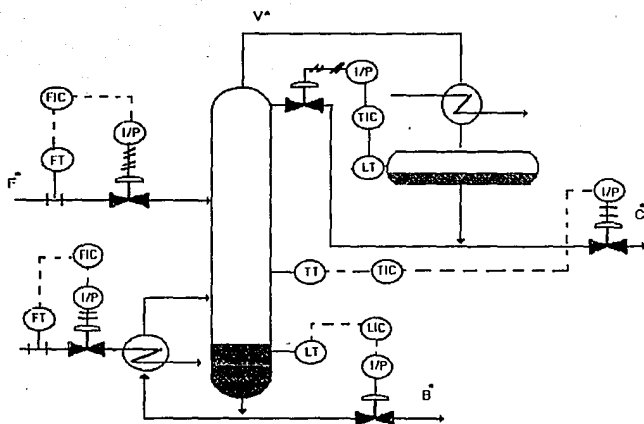


FIGURA 3.7 CONTROL DIRECTO DEL BALANCE DE MATERIAL.



F = FLUJO DE ALIMENTACION

V = FLUJO DE VAPOR EN EL DOMO

B = FLUJO DE LIQUIDO EN EL FONDO

C = CANTIDAD DE LIGEROS CONDENSADOS

\* NOMENCLATURA DE LA FIGURA 3.7

Estos compresores se utilizan para una gran variedad de servicios, incluyendo enfriamiento y desecación; suministro de aire de combustión a hornos y calderas; sopladores de altos hornos y convertidores; transporte de materiales sólidos por proceso de flotación, por agitación y aireación o por ventilación; como eliminadores y para comprimir gases o vapor.

El principio de funcionamiento, se puede mostrar en forma breve, en la figura 3.8. Se aplica potencia de una fuente exterior al eje A, que hace girar el impulsor B dentro de la caja C. Las hojas del impulsor al girar producen una reducción de presión a la entrada del orificio del impulsor, esto hace que fluya aire al impulsor desde la tubería de succión D. Este aire se ve obligado a salir a lo largo de las paletas a velocidades tangenciales crecientes. La velocidad de carga adquirida al salir de las puntas de las paletas, se convierte en carga de presión conforme pasa el aire a la cámara espiral y, de ésta última, a la descarga E, puesto que la presión se desarrolla mediante una fuerza centrífuga, es muy importante conocer la densidad del gas que se va a comprimir, los compresores desarrollan una presión en su interior, que depende de la naturaleza y las condiciones del gas manejado, será preciso determinar, al escoger un soplador de tamaño adecuado, la combinación de las condiciones más adversas que se puedan presentar simultáneamente.

#### NECESIDADES DE CONTROL.

El costo de control debe ser considerado, pero realmente éste está usualmente subordinado a los requerimientos de confiabilidad, especialmente en vista del papel clave que el compresor tiene en el proceso. La naturaleza crítica del control de compresores se extiende a su sistema de sello y lubricación, y debe proporcionar una operación ininterrumpida libre de fallas por largos períodos de tiempo.

#### FILOSOFÍAS DE CONTROL.

**MANIPULACIÓN DE LA SUCCIÓN.** La capacidad de un compresor centrífugo puede ser controlada colocando una válvula de control en la línea de succión alterando de este modo la presión de entrada (PI). La siguiente ecuación es la base para graficar las curvas del compresor y para llegar a entender la operación de los controles de capacidad:

$$TW/W = (ZRTI/(n-1)/n)(PD/PI)^{(n-1)/n}$$

en donde TW = torca, W flujo másico, I condiciones de entrada, D de descarga y n, Z y R son constantes, de la ecuación anterior se puede ver que la presión de descarga será alterada para un flujo dado cuando la presión PI cambia, y una nueva curva del compresor será generada.

**MANIPULACIÓN DE LA DESCARGA.** Una válvula de control en la descarga del compresor centrífugo puede también ser usada para controlar su capacidad. Refiriéndose a la figura 3.9, si el flujo se quiere reducir de 9600 lbm/hr en el punto (1) a 5900 lbm/hr, el compresor debe seguir la curva 1 y de esta manera operar en el punto (4), a 190 psi de presión de descarga y 72% de

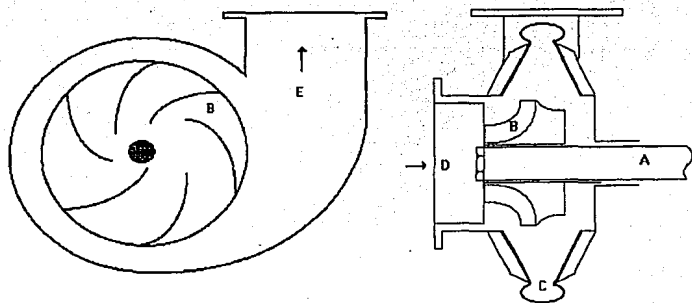


FIGURA 3.8 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE COMPRESOR CENTRIFUGO.

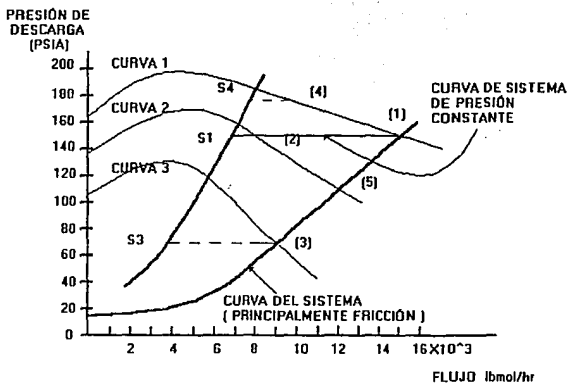


FIGURA 3.9 CURVAS DE UN COMPRESOR CENTRÍFUGO.

eficiencia. Sin embargo, la curva del "sistema principalmente de fricción" a esta capacidad requiere únicamente 68 psi de presión de descarga, por lo tanto, los 122 psi de presión de exceso deben ser eliminados en la válvula de control de la descarga. El flujo de surge<sup>2</sup> es 4000 lbm/hr, y el compresor está por lo tanto operando a 5400/4000 -148% de la línea de surge, de esta manera el "surge" es más probable de ocurrir en un "sistema principalmente de fricción" cuando se manipula la descarga que cuando se manipula la succión.

**MANIPULACIÓN DE LAS ASPAS DE ENTRADA<sup>3</sup>.** Este método de control emplea un ajuste del ángulo de las aspas de entrada. Sin embargo, no es significativamente más económico que variar la presión de entrada, también es menos confiable. En este método, las aspas guías ajustables en la entrada a la etapa del compresor son usadas para prerrotar o contrarrotar la corriente de gas con respecto a la rotación del impulsor. Por lo tanto, este método baja o sube la cabeza de descarga, a una rapidez y flujo constante.

**MANIPULACIÓN DE LA RAPIDEZ.** Variar la rapidez del compresor es el medio más económico de control de la capacidad, pero no es practicado a menudo debido a problemas mecánicos, principalmente con transmisores de rapidez y gobernadores, la relación de presión desarrollada por un compresor centrífugo está relacionada con la rapidez del impulsor, la variación de presión de descarga puede ser graficada como un porcentaje de la rapidez de diseño (figura 3 10)

Las ventajas de este método son:

- a) La presión de succión y la descarga pueden ser especificadas independientemente del flujo.
- b) Es efectivo para ahorrar energía ya que la potencia de entrada es reducida por el cuadrado de la rapidez.

**MANIPULACIÓN DEL FLUJO "SPILLBACK".** El método de variar el flujo de "spillback" es frecuentemente usado debido a que es un método seguro. Esta técnica trabaja gracias a un compresor con una rapidez dada, el cual bombeará una cantidad fija de gas contra una cabeza fija, si una válvula de "spillback" es abierta, retornando gas comprimido a la succión, el flujo neto de gas saliendo del compresor será reducido, el total flujo de gas a través del compresor permanecerá constante y arriba del punto de "surge". Sin embargo, este método es costoso pues el gas es comprimido y entonces retornado a la línea de succión.

**PROTECCIÓN DEL "SURGE".** El propósito de un sistema de control "antisurge" es proteger al compresor y al proceso de "surge"; puede ser un sistema separado e independiente del control normal del compresor, o bien, puede ser parte del sistema de control de capacidad. Los sistemas de control "antisurge" más comunes son los siguientes:

---

<sup>2</sup> La línea de "surge" representa el límite de flujo bajo para comprimir; abajo del cual la operación es inestable debido a la inversión de flujo momentáneo.

<sup>3</sup> Guide Vans.

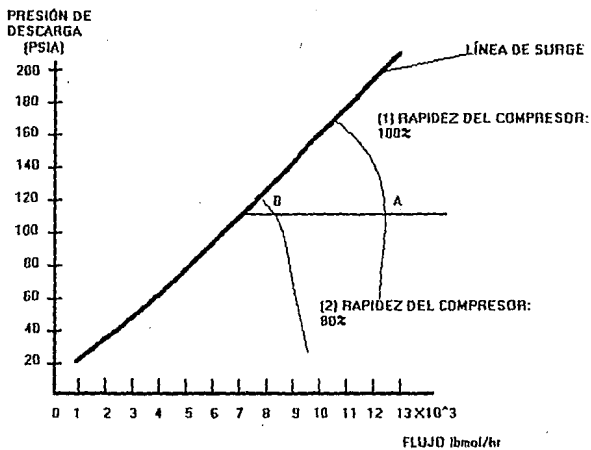


FIGURA 3.10 CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN COMPRESOR CENTRÍFUGO.

- a) *Flujo mínimo.*
- b) *Flujo mínimo con control de rapidez.*
- c) *Sistema Flujo-Rapidez.*
- d) *Mínimo Flujo-Posición de aspas.*
- e) *Flujo-Caída de Presión.*

*Flujo mínimo.* Probablemente es la forma más simple de la protección de "surge", este sistema usa un predeterminado mínimo flujo como el punto de ajuste para un controlador de protección de "surge". Para trabajar este método apropiadamente, el compresor debe operar a una rapidez constante y densidad de gas constante; la presión de succión y la temperatura deben mantenerse constantes.

*Flujo mínimo con control de rapidez.* La protección del "surge" se proporciona manipulando la rapidez del flujo en el sistema.

*Sistema flujo-rapidez.* La rapidez del compresor determina el punto de ajuste de un controlador de flujo de "spillback". El punto de ajuste "antisurge", por lo tanto llega a ser una función de la rapidez del compresor.

*Flujo mínimo-posición de las aspas.* El punto "surge" es una función de la posición de las aspas guías de entrada como es la rapidez del compresor, el sistema "antisurge" usa la posición de las aspas guías como un remoto punto de control para un controlador de flujo de retorno a la succión ("spillback").

*Flujo-Caída de Presión.* El método de control de flujo-Caída de Presión es el más efectivo sistema de protección del "surge", debido a que es independiente de la rapidez del compresor y condiciones de succión.

### 3.4 FILOSOFÍAS DE CONTROL PARA GENERADORES DE VAPOR.

#### PRINCIPIOS GENERALES.

El vapor no es únicamente una fuente de energía directa para la operación de bombas y turbinas, también es el medio más útil de calentamiento en una planta de proceso, aunque algunas plantas pueden comprar energía eléctrica, la mayoría de las plantas de proceso generalmente producen vapor.

En las etapas iniciales de la generación de vapor, se evapora agua que está en equilibrio, a la presión de generación, con agua en punto de ebullición, este vapor de agua se denomina vapor saturado y cualquier disminución de temperatura o aumento de presión hará comenzar la condensación; para la mayoría de los usos, la humedad en el vapor no es deseable y es perjudicial a equipos tales como las turbinas, cuyos álabes son severamente erosionados por el vapor húmedo; por consiguiente, el vapor es calentado por arriba de su temperatura de saturación para estar lo suficientemente seco y proporcionar vapor libre de humedad a todos los usuarios.

Un generador de vapor, está diseñado para producir vapor de agua a una determinada presión y temperatura. El propósito primordial de la instrumentación es el mantener constante la presión de vapor en el cabezal a pesar de las variaciones de carga. Es común que el vapor generado se use para operar dispositivos tales como calentadores, turbinas de vapor, etc., los cuales se ven afectados por las variaciones en la presión del vapor.

Este equipo se compone de dos partes primordiales: el hogar: proporciona el calor por medio de un combustible, y la caldera: el calor se transmite al agua en circulación para formar vapor.

Las consideraciones aquí expuestas se refieren a calderas cuyo combustible es gas natural o aceite, pues el carbón es un combustible poco usado en México.

### NECESIDADES DE CONTROL.

La combustión debe llevarse a cabo bajo condiciones controladas. La intensidad de la combustión, y por tanto, la admisión de combustible estará de acuerdo con la demanda de vapor, cuyos cambios se reflejan en la presión de vapor en el cabezal.

Considerando los recientes problemas de escasez de energéticos y contaminación de aire, es de vital importancia el que, a toda carga, se tenga una óptima relación de aire/combustible; es decir el sistema de combustión deberá tener la cantidad de aire adecuado para asegurar una combustión completa. Aire en exceso del necesario hará una combustión completa pero con calorías desperdiciadas en los gases de chimenea y en calentar una cantidad de aire mayor de la estrictamente necesaria para quemar el combustible.

En resumidas cuentas, el aire en exceso o en déficit no sólo desperdicia combustible y por tanto dinero sino que, en algunos casos puede limitar la producción de vapor.

### FILOSOFÍAS DE CONTROL.

*CONTROL DE NIVEL DE DOMO.* Desde el punto de vista de seguridad, el nivel del domo es una de las variantes más críticas por controlar en una caldera.

Si se opera a un nivel muy alto ocurrirán arrastres de agua a las líneas de vapor, agua que, por impacto, puede destruir la maquinaria alimentada por vapor, por el contrario, si el nivel es bajo, pueden dañarse seriamente los tubos de la caldera que comunican el domo superior con el (los) inferior(es), estos tubos están en condiciones normales llenos de agua, la cual al evaporarse, los refrigera, en el momento de vaciarse, la refrigeración cesa y, la situación se prolonga, el sobrecalentamiento a que se sujetan los tubos puede dañarlos en forma permanente.

Normalmente, el nivel es una de las variables de más fácil control, en la mayoría de los casos el circuito de control se aproxima bastante a un sistema de primer orden; sin embargo en una caldera, éste no es el caso, existen factores que complican la situación; uno de estos factores



es que las variaciones de nivel pueden ser muy rápidas tanto más cuanto menor sea el tiempo de retención de la caldera debido al domo el cual puede averiguarse por medio del siguiente cociente:

$$\frac{\text{contenido normal de agua en el domo superior (kg)}}{\text{producción normal de vapor de la caldera (kg/min)}} = \text{min}$$

Fácilmente se comprende que entre menor sea el parámetro anterior más difícil será mantener el nivel constante.

#### *Sistema de control de un elemento.*

Este sistema es aplicable solamente cuando el tiempo de retención de la caldera es grande, cuando las variaciones de carga esperadas son lentas o cuando ocurren ambas cosas. El sistema de un elemento, como se indica en la figura 3 11 consiste de un transmisor de nivel de tipo diferencial, un controlador de dos modos y una válvula en la línea de agua de alimentación, la cual se encargará de mantener el nivel del domo. En resumen, el control de nivel de un elemento es un circuito como el usado en cualquier otra aplicación normal de control de esta variable.

#### *Sistema de control de dos elementos.*

En el sistema de control de dos elementos, se emplea un circuito de control abierto (feedforward) de muy rápida respuesta a los cambios de demanda, se le hace funcionar en conjunto con un circuito de control cerrado (feedback) responde más lentamente pero es sensible a cualquier motivo que afecte la variable controlada.

El circuito de control abierto consiste de un transmisor de flujo de vapor FT con extractor de raíz cuadrada FY, o en su defecto, de un transmisor lineal de flujo de vapor. La señal de flujo de vapor proporcionada a la válvula de admisión de agua LV la cual deberá de ser de características lineales y con un posicionador con leva para poder caracterizar la posición de la válvula con la señal recibida. En estas circunstancias y caracterizando adecuadamente la leva del posicionador se obtendrá un gasto de agua proporcional al gasto de vapor, esto compensará al sistema por variaciones de carga y por purga continua, siempre y cuando ésta última sea un porcentaje fijo del agua alimentada.

Teóricamente, si el agua admitida es igual a la suma de vapor producido y gasto por purga continúa, el nivel no debería variar de su valor inicial, sin embargo, existen circunstancias determinantes para no cumplir el balance, estas circunstancias son:

- a) variaciones en la presión del domo
- b) variaciones en la presión de agua de alimentación
- c) caracterización imperfecta del posicionador de la válvula de admisión de agua
- d) errores de medición de instrumentos los cuales se integran en el mismo tiempo
- e) variaciones en el porcentaje de purga continua

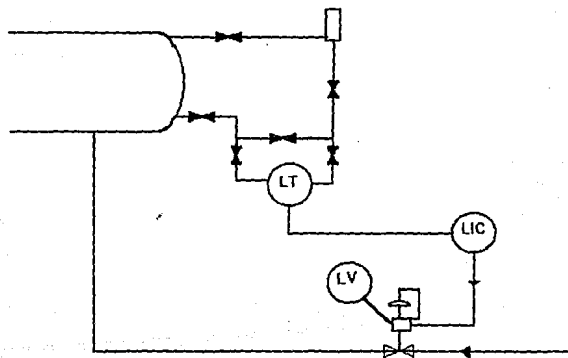


FIGURA 3.11 CONTROL DE UN ELEMENTO.

Dadas tales condiciones se hace necesaria la presencia del circuito cerrado de control de nivel, el mecanismo únicamente reajusta la salida del sistema a la válvula, compensando las imperfecciones anotadas, manteniendo el nivel a su valor exacto.

### *Sistema de tres elementos.*

Este sistema tiene mejores características dinámicas y no requiere de laborioso trabajo de caracterización. En este trabajo sólo se revisarán algunas de las versiones de un control de nivel de tres elementos. Tal sistema lleva a cabo el trabajo de dos con las siguientes ventajas:

- Suministra una compensación más exacta a los cambios de carga eliminando la necesidad de caracterizar la leva de la válvula de control.
- Elimina el efecto de variaciones razonables en la presión del cabezal de agua de alimentación así como también el de las variaciones de presión dentro de la caldera, ambos efectos afectan desfavorablemente el flujo de agua de alimentación, lo que se traduce en un control imperfecto del nivel del domo:
- Es más fácil recalibrar al cambiar el % de purga continua pues, en un sistema de dos elementos este cambio implica la recharacterización de la leva del posicionador de la válvula de agua. En un sistema de tres elementos sólo implica el modificar la ganancia de un componente.

El sistema de tres elementos, figura 3.12, es un arreglo en cascada en donde el controlador secundario mantiene el balance de material y el flujo de vapor/flujo de agua de alimentación. El rango de los medidores de flujo de vapor y de flujo de agua no son normalmente iguales, por esto se hace necesario la introducción de la constante  $K_I$  en el relevador FY3, constante que sirve para compensar por % de purga continua. En este arreglo, bajo condiciones normales el controlador secundario mantiene la entrada de agua en proporción exacta a la salida de vapor y, el controlador primario alerta las condiciones de este balance de acuerdo con el nivel del domo.

### *CONTROL MAESTRO DE PRESIÓN.*

El control maestro de presión de la caldera o batería de calderas, es el sistema que ordena inmediatamente una señal analógica adecuada, la necesidad de aumentar o disminuir el ritmo de combustión para mantener la presión del cabezal constante. La figura 3.13 ilustra un control maestro de presión del tipo más sencillo, sensible únicamente a la presión de vapor en el cabezal de la caldera

El sistema consiste en un transmisor de presión y de un controlador con acciones proporcional e integral. Este sistema es adecuado cuando las variaciones de carga esperadas no son muy bruscas.

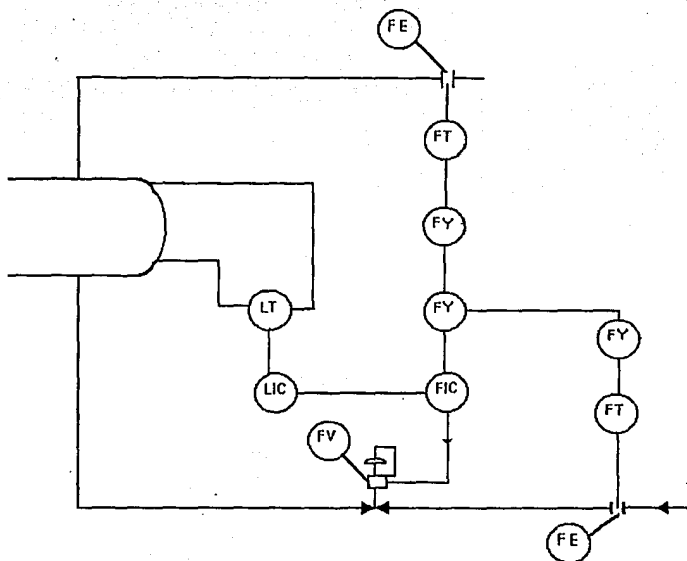


FIGURA 3.12 SISTEMA DE TRES ELEMENTOS.

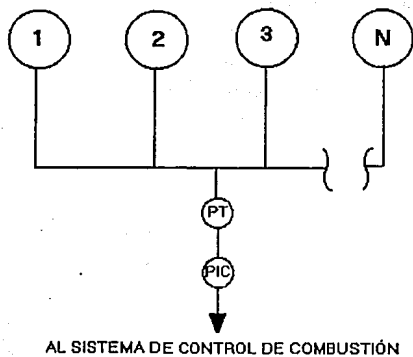


FIGURA 3.13 CONTROL MAESTRO DE PRESIÓN.

## **CONTROL DE COMBUSTIÓN.**

El control de combustión supone la modulación del flujo de combustible y aire de acuerdo a las demandas del control maestro de presión. La importancia de la correcta relación aire/combustible ya se ha mencionado.

Deberá evitarse el medir el aire de combustión por métodos inferenciales tales como la diferencia de presión entre caja de aire y hogar, caída de presión a través de sobrecalentador, etc. Se recomienda que la medición se lleve a cabo con un tubo venturi inserto en los ductos de tiro forzado.

Es condición que las señales que análogicamente representan los gastos de combustible (s) y aire sean lineales con los mismos, será necesario, si los transmisores usados son lineales con el cuadrado del gasto, el usar extractores de raíz cuadrada en las señales respectivas.

El sistema de control de combustión recomendado, figura 3.14, es el llamado tipo "Lead-Lag", en este sistema la señal de demanda del control maestro de presión posiciona los puntos de ajuste de los controladores de flujo de aire y flujo de combustible en forma prácticamente simultánea, esto ofrece características de respuesta rápida como un sistema paralelo de control de combustión.

Para hacer el sistema más seguro y garantizar que en ninguna circunstancia se tendrá mezcla "rica" en el hogar, lo que en el mejor de los casos produce humo y en el peor mezclas explosivas al alcanzar el combustible no quemado a el exceso de aire en las partes finales de la caldera, se ha agregado al sistema descrito dos relevadores selectores de señal (FY1B, FY2B):

El primero es un selector de máxima señal situado antes del ajuste de set-point del controlador de flujo de aire, este selector (FY1B) compara la demanda del maestro de presión con los requerimientos de aire del combustible quemado en ese momento, este selector impide que haya defecto de aire cuando la demanda disminuye, pues el mismo no será reducido sino hasta que el combustible alimentado haya sido recortado.

El segundo selector (FY2B) es un selector de mínimo y está en la línea que fija el punto de ajuste del controlador de flujo de combustible y compara la demanda del maestro de presión con el aire disponible por la combustión en un momento dado, de esta forma no permite incrementar el gasto de combustible mientras no haya suficiente aire para quemarlo, este arreglo impide defectos de aire cuando la demanda aumenta.

## **CONTROL DEL % DE O<sub>2</sub> EN GASES DE COMBUSTIÓN.**

Cuando se usa un circuito de control de % de O<sub>2</sub> en los gases de combustión, la salida del controlador de esta variable se alimenta al control de combustión. El controlador de % O<sub>2</sub> alterará en forma automática la relación aire/combustible dando el análisis de O<sub>2</sub> en gases de combustión que produzca la máxima eficiencia de la caldera.

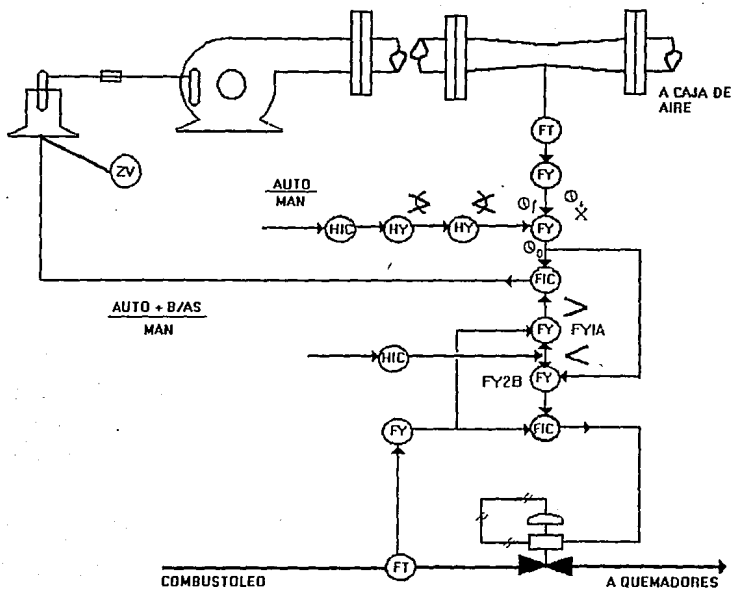


FIGURA 3.14 CONTROL DE COMBUSTIÓN TIPO LEAD-LAG.

Dado el gran retraso existente en este circuito de control y el frecuente mantenimiento requerido por los analizadores de  $O_2$  y sus respectivos sistemas de muestreo, no siempre se obtiene éxito con el uso de este loop, por lo que no deberá incluirse el analizador con este objetivo.

Se recomienda incorporar la posibilidad del circuito de control de %  $O_2$  solamente cuando se tenga el analizador por requerimiento, en cuyo caso el agregar el circuito de control puede hacerse a un costo relativamente bajo.

### 3.5 SELECCIÓN DE BOMBAS.

Las plantas de proceso no funcionarían si no fuera por las bombas mediante las que se mantiene un flujo estable de los fluidos a través de la planta, estableciéndose un proceso continuo. La selección inadecuada de estos equipos crea varios problemas en la operación de las plantas, por lo tanto el ingeniero debe tener una cuidadosa supervisión respecto a la selección, compra e instalación de las bombas.

Las bombas tienen fabricación estándar. Lo fundamental para cada caso es seleccionar el tamaño y el tipo que más ajuste a las necesidades de servicio requeridas.

### TIPOS MAS COMUNES DE BOMBAS USADAS EN LOS PROCESOS INDUSTRIALES.

**BOMBAS DE PISTÓN.** Se utilizan principalmente para cargas altas con bajas capacidades. En la figura 3.15 se muestran los intervalos de utilización de diferentes tipos de bombas. La experiencia ha revelado la ventaja de emplear bombas de pistón, propulsadas con vapor, para instalaciones temporales o para condiciones variables o intermitentes, como las diseñadas en algunos tanques.

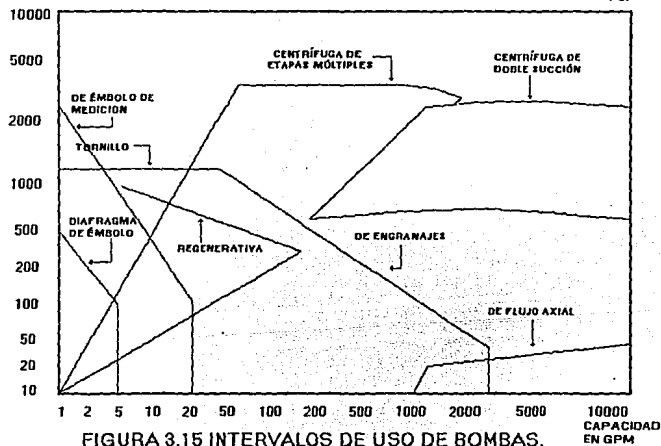
Para instalaciones en las que no es una desventaja tener flujo inestable, se usa con mucha ventaja la rigidez, la flexibilidad y las características económicas que estas bombas poseen, con frecuencia se prefiere a las bombas de pistón para el bombeo de líquidos altamente volátiles (especialmente cuando se tienen condiciones de gasificación), pastas aguadas y líquidos viscosos. En la figura 3.16 se muestra una clasificación de las bombas de pistón.

**BOMBAS DE VOLUMEN CONTROLADO.** Estas bombas se utilizan para alimentar de manera muy exacta los flujos necesarios de un proceso y para proporcionar flujos de varias corrientes a reactores y a tanques de tratamiento o mezcladores, además de bombear actúan como aparatos medidores del volumen del flujo bombeado, estas unidades fueron diseñadas para producir en la descarga presiones manométricas de valor hasta de 25000 psi. Las bombas de volumen controlado poseen motor eléctrico o neumático dependiendo del lugar de operación. Cuando éste es peligroso se prefieren las de motor neumático, se utilizan frecuentemente en el bombeo de productos químicos, para lo cual son fabricadas en diversos materiales dependiendo del servicio a efectuar.



CARGA EN  
PIES DE LIQUIDO

PRESION  
PSI



## BOMBAS DE PISTÓN

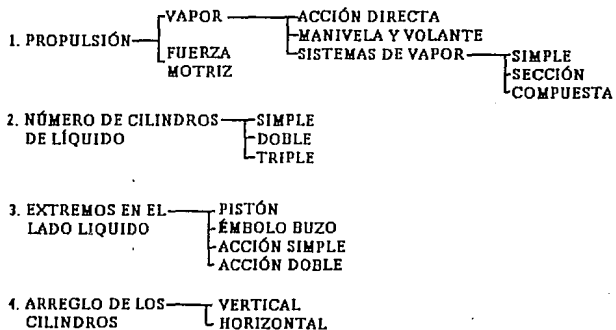


FIGURA 3.16 CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS DE PISTÓN.

**BOMBAS DE DIAFRAGMA.** (Figura 3.17) Algunas de estas bombas se diseñan especialmente para ciertos tipos de servicios, poseen un émbolo macizo sujeto a un diafragma flexible de caucho, éste es el único material que hace contacto con el fluido bombeado. El movimiento hacia arriba y hacia abajo del diafragma produce la acción del bombeo. Estos equipos son apropiados para dar movimiento a fluidos muy espesos tales como sedimento o lodo.

**BOMBAS CENTRÍFUGAS.** El desarrollo de estos equipos ha sido extraordinario; actualmente se usa para cualquier tipo de servicio, existen con capacidades desde 5 gpm y diferencial de presión de 2 a 5 psi hasta bombas de pasos múltiples de 2800 a 3000 gpm y presión manométrica en la descarga de 3000 psi. También existen diseños que manejan fluidos hasta de 850 °F altamente volátiles y lechosos, ver figura 3.18

En el sentido más amplio, una bomba centrífuga consiste en un rodete que produce una carga de presión por la rotación del mismo dentro de una cubierta. Las diferentes clases de bombas se definen de acuerdo con el diseño del rodete, que puede ser para flujo radial o axial.

Dentro de los servicios ofrecidos por las bombas centrífugas se encuentran las siguientes:

- Servicio general
- Aceite caliente (hidrocarburos y sustancias químicas en condiciones de temperaturas altas)
- sustancias químicas

**BOMBAS ROTATORIAS.** Las bombas rotatorias son de desplazamiento positivo, y a través de su acción rotatoria atrapan por medios mecánicos al líquido en el lado de la succión y lo liberan en el lado de la descarga. Las bombas de este tipo producen presiones hasta de 5000 psi y gasto de 1000 gpm (bombas de engrane interno).

Las bombas rotatorias se emplean con mucha ventaja en las plantas de proceso para bombeo de líquidos viscosos difíciles de manejar con bombas centrífugas, fácilmente pueden bombear fluidos con viscosidades tan altas como de 400000 centistokes.

**BOMBAS PERIFÉRICAS O TURBINAS.** Este tipo de bombas se muestran en la figura 3.19 desarrollan cargas muy altas para la recirculación del líquido en las aletas, de esta forma, aún cuando estas bombas están diseñadas para capacidades pequeñas, también pueden diseñarse para cargas elevadas, teniendo gran aplicación con este servicio.

## ESPECIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE BOMBAS.

La selección del equipo más apropiado de bombeo para determinado servicio, requiere de la cooperación de los representantes de los fabricantes, de la hoja de especificación de normas (para la presentación ordenada de la información del proceso) y de los esquemas y conocimientos que los ingenieros puedan proporcionar adecuadamente para llevarla a cabo. También es necesario tomar en cuenta, en los cálculos y diseños, los factores de seguridad adecuados tanto para capacidad como para carga.

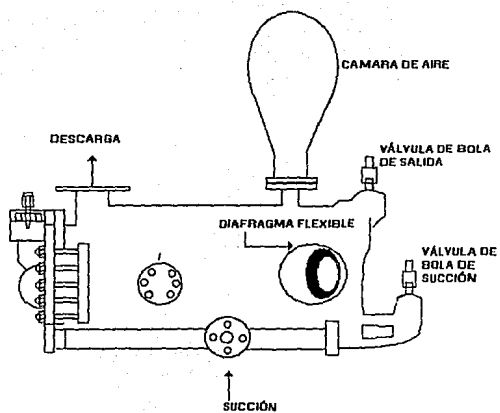


FIGURA 3.17 BOMBA DE DIAFRAGMA.

## BOMBAS CENTRÍFUGAS

1. FLUJO RADIAL — EL RODETE ENVÍA POR FUERZA CENTRÍFUGA AL FLUÍDO EN DIRECCION RADIAL HACIA LA PERIFERIA.
2. FLUJO MIXTO — LA CARGA SE DESARROLLA EN UN RODETE DELGADO, EN PARTE POR FUERZA CENTRÍFUGA Y EN PARTE POR EL EMPUJE DE ALETAS. LA DESCARGA ES UNA COMBINACIÓN DE FLUJO AXIAL Y RADIAL.
3. FLUJO AXIAL — CASI TODA LA CARGA PRODUCIDA POR EL RODETE ES DEBIDA A LA ACCIÓN IMPELENTE DE LAS ALETAS. EL FLUÍDO ENTRA Y SALE DEL RODETE EN DIRECCIÓN AXIAL O CASI AXIAL.

FIGURA 3.18 CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS CENTRÍFUGAS.

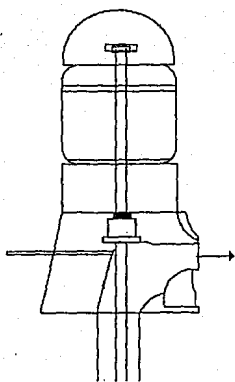


FIGURA 3.19 BOMBA DE TURBINA.

Algunos factores de seguridad arbitrarios conducen a la selección de una bomba con mayor costo. En tal caso se deberá hacer una reducción del factor de seguridad arbitrario, modificando las condiciones de diseño y por lo tanto el costo de la bomba. También debe considerarse el tipo de bomba de relevo que suplirá a la bomba principal cuando requiera de reparación o mantenimiento, debe compararse el trabajo por unidad de masa (carga) para cada uno de los servicios, así como también la presión diferencial y la capacidad.

### 3.6 TIPOS MÁS COMUNES DE VÁLVULAS USADAS EN LOS PROCESOS INDUSTRIALES.

Una válvula es el elemento final de control y también el elemento que altera el valor de la variable manipulada en respuesta a la señal de salida proveniente del controlador automático, la señal de salida obtenida de un dispositivo de control de manejo manual o por alguna manipulación manual directa. En instalaciones de control automático, éste consta normalmente de dos partes:

- 1) un accionador o actuador que traduce la señal de salida del dispositivo controlador en una acción que comprende una gran fuerza o la manipulación de una energía de gran magnitud y;
- 2) un dispositivo que responde a la fuerza del accionador y ajusta el valor de la variable manipulada. Por ejemplo, el actuador se puede utilizar para cambiar la posición de un tapón de válvula en un orificio, la velocidad de un dispositivo giratorio o la cantidad de energía suministrada a una carga eléctrica.

Dentro de un proceso, sea cual sea, las válvulas de control son los elementos más importantes en el sistema de control y se consiguen en una gran variedad ilimitada de materiales y diseños, sin embargo se simplifica su mantenimiento y almacenaje en una planta si se conserva al mínimo el número de tipos de válvulas en existencia; puede resultar muy económico, tratándose de válvulas pequeñas, seleccionar uno o dos diseños que satisfagan a todos los servicios. La *válvula* por definición, es un dispositivo mecánico colocado en la corriente de un flujo capaz de ajustar el área variable expuesta al fluido, de acuerdo con los requerimientos del proceso y controlar así su gasto.

Las jerarquías de control de estos dispositivos son tres:

*Capacidad.* La capacidad se mide como "Cv", se define como el número de galones por minuto de agua a 60 °F que pueden fluir a través de la válvula de control con una Caída de Presión de 1 psia, a una presión estable y un porcentaje de abertura.

*Característica.* La característica es la relación que existe entre el cambio de flujo con respecto al movimiento del tapón o émbolo desde 0 hasta 100% de su carrera al mantenerse una Caída de Presión constante a través de la válvula. Para este caso, los flujos más característicos son:

- Igual porcentaje
- Lineal
- Abertura rápida

### -Parabólica modificada

**Rangeabilidad.** Es la relación del rango de flujos, altos y bajos, a través de los cuales la válvula de control tiene o puede dar un control estable.

Muchas válvulas de control tienen cierta estructura, como se ilustra en la figura 3.20, y poseen características comunes:

**Un cuerpo.** Capaz de resistir la presión, temperatura, corrosión, abrasión y otras propiedades del fluido de proceso.

**Una guarnición o vestidura (trim).** Compuesto a su vez por un asiento, veleta, vástago, guía para el émbolo y un forro, esto depende de las características de la válvula.

**Una cubierta.** O estructura de sellado a presión, la cual se localiza en el cuerpo de la válvula, sujeto a las mismas condiciones de presión y temperatura de la misma, además de contener las partes del vástago y el sellado, que capacita al vástago para abrir o cerrar la válvula sin derramar el fluido del proceso.

**Un actuador.** Normalmente opera con aire un diafragma o pistón, el cual traslada una señal del controlador de la válvula dentro de una posición del vástago. El resorte opone la fuerza del aire en el diafragma para mantener al émbolo en posición contra la fuerza del flujo de fluido.

### ESPECIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE VÁLVULAS.

La selección conveniente de una válvula de control requiere del conocimiento del proceso, el criterio de diseño del usuario, costo, disponibilidad, entrega a tiempo, servicios ingenieriles del fabricante y las partes libres.

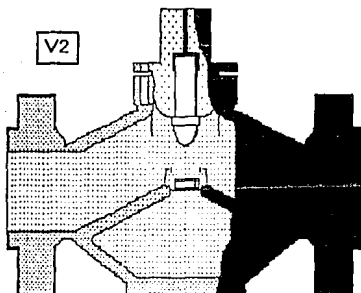
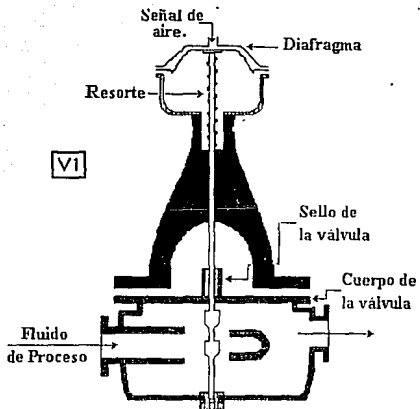
Las válvulas de control deben ser dimensionadas por alguna fórmula, ya sea regla de deslizamiento o por computadora. Todos los métodos encuentran el  $C_v$  para fluidos líquidos, o para gases y vapor el  $C_g$  o  $C_s$  respectivamente. Dados esos criterios, se puede seleccionar la válvula adecuada para las condiciones del proceso y la capacidad requerida utilizando un catálogo de fabricante.

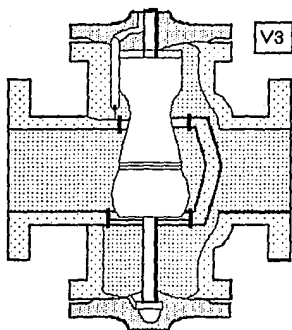
Los diferentes tipos de válvulas son comparados en la figura 3.21, la cual puede ayudar al ingeniero a tener una idea de cuál es la que se pega más a sus necesidades.

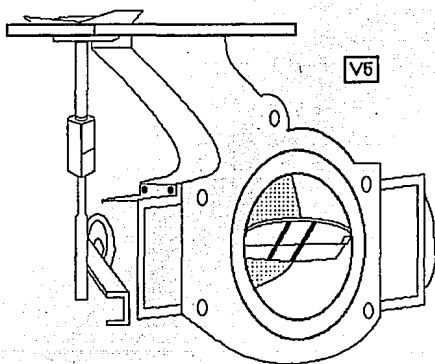


- V1** ESTRUCTURA BÁSICA DE UNA VÁLVULA DE CONTROL
- V2** TIPO GLOBO CON PUERTO SIMPLE
- V3** TIPO GLOBO CON DOBLE PUERTO
- V4** MARIPOSA DE COLA DE PESCADO Y PALETA DE BAJO TORQUE
- V5** MARIPOSA CON PALETA ESTÁNDAR

FIGURA 3.20 ESTRUCTURAS DE VÁLVULAS DE CONTROL.







TIPO	GENERALIDADES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
VÁLVULA DE GLOBO CON PUERTO SIMPLE	AMPLIAMENTE DISPONIBLE EN TAMAÑOS PEQUEÑOS (16") CONDICIONES STANDAR DE 1500 PSIG Y 450 F	BAJA RECUPERACIÓN DE PRESIÓN, DIMENSIONALES ESTÁNDAR CARA A CARA, DISPONIBILIDAD DE VESTIDURA, ESTRECHO AISLAMIENTO	ALTOS COSTOS DE /CV, REQUIERE DE LARGA OPERACIÓN, LOS TAMAÑOS ARRIBA DE 4" NO SON COMPETITIVOS, LIMITADA RANGEABILIDAD
VÁLVULA DE GLOBO CON PUERTO DOBLE	IGUAL QUE LAS DE PUERTO SIMPLE	REQUERIMIENTOS BAJOS DE OPERACIÓN, LAS MISMAS QUE LAS PUERTO SIMPLE	LIMITADA RANGEABILIDAD, LOS TAMAÑOS ARRIBA DE 4" NO PUEDEN SER OPERABLES, NO TIENE ESTRECHO AISLAMIENTO
VÁLVULA ENJAULADA O BALANCEADA	DISPONIBLE EN TAMAÑOS GRANDES, TAMAÑO ESTÁNDAR DE 6", CONDICIONES ESTÁNDAR DE 2500 PSIG Y 450 F, REDUCE EL RUIDO DE LA VESTIDURA	ALTA CAPACIDAD, MENORES COSTOS/CV, MAYOR RANGEABILIDAD QUE LA DE GLOBO, PRODUCE MAS SUAVIDAD EN LA POSICIÓN DEL ÉMBOLO DIMENSIONES ESTÁNDAR CARA A CARA	EL ESTRECHO AISLAMIENTO REQUIERE DE UNA VESTIDURA ESPECIAL, LA CUAL REDUCE LA CAPACIDAD
VÁLVULA DE GLOBO, ENJAULADA O SIN BALANCEO	IGUALES QUE LAS BALANCEADAS	EL ÉMBOLO TIENE ESTRECHO AISLAMIENTO, BAJA EL RUIDO DE LAS VESTIDURAS DISPONIBLES	LA VESTIDURA REDUCE LA CAPACIDAD

FIGURA 3.21 COMPARACIÓN DE LOS TIPOS DE VÁLVULAS

<p>MARIPOSA CON PALETA ESTÁNDAR</p>	<p>DISPONIBLE EN TAMAÑOS GRANDES, TAMAÑO ESTÁNDAR DE 36" A 2500 PSIG, TAMAÑO ESPECIAL DE 60", CARACTERISTICA NORMAL APROXIMADA A IGUAL PORCENTAJE</p>	<p>MUY BAJO COSTO/CV, JUSTA RANGEABILIDAD, ALTA CAPACIDAD, BUEN CONTROL A BAJO CAMBIO DE PRESIÓN, PESO LIGERO, POCAS PARTES PARA MANTENIMIENTO</p>	<p>CONTROL LIMITADO PARA ABERTURA DE 60 F, ALTA RECUPERACIÓN DE PRESIÓN, SUSCEPTIBLE AL FLUJO ESTRANGULADO, REQUIEREN DE ESPECIAL FORRO, ALTO AISLAMIENTO POR PRESIÓN</p>
<p>MARIPOSA DE COLA DE PESCADO Y PALETAS DE BAJO TORQUE</p>	<p>PALETAS DISEÑADAS PAR REDUCIR EL TORQUE</p>	<p>BUEN CONTROL PARA ABERTURA DE 90 F, INCREMENTO DE LA CAPACIDAD</p>	<p>SON LAS MISMAS QUE LAS DE PALETAS ESTÁNDAR. EXCEPTO EL CONTROL, 90</p>

FIGURA 3.21 COMPARACIÓN DE LOS TIPOS DE VÁLVULAS (CONTINUACIÓN)

## CAPÍTULO IV. SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO.

El papel de la instrumentación con equipos de control automático, en *arquitecturas de sistemas de control distribuido*, se hace más evidente al llenar los requerimientos sociales para una utilización más efectiva de la energía y otros recursos naturales, y para un mayor ahorro de mano de obra dirigido a mejorar la productividad. Bajo estas circunstancias, aquellas industrias básicas, como la petrolera, petroquímica y del acero, entre otras, persiguen alcanzar méritos mayores y su operación de planta se hace más complicada, tomando ventaja de la tecnología moderna.

El propósito principal de la instrumentación es proporcionar una operación de sistemas, y control de plantas más eficiente y seguro. El mayor reflejo económico, podría resaltar en los costos de operación, una posible maximización de producción por cantidad de materiales y una mayor eficiencia en la utilización de la energía.

### 4.1 CONCEPTO GENERAL DE UN SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO (DCS).<sup>1</sup>

Para comenzar a entender este sistema, se encontró una analogía en los tres modos posibles de interacción: jerárquico, republicano y democrático. Un sistema jerárquico requiere de un dirigente, quien designará continuamente las órdenes o comandos. Un sistema republicano requiere que todas las decisiones sean tomadas mediante el voto, aunque el primer sistema puede ser más eficiente, carece de realidad, pues puede existir el fracaso del dirigente, ya sea por muerte o irracionalidad. El sistema republicano es más real, puede sobrevivir al fracaso de algunos individuos, pero existe un inconveniente, que el proceso de voto es lento e ineficiente. Por otro lado, en el sistema democrático, se nombran dirigentes y objetivos para cada tarea y durante ésta cada dirigente es obedecido. Por analogía, en un sistema de control distribuido se asigna una tarea a cada *procesador*, asumiéndole toda la responsabilidad, en una estructura de *control en paralelo*, pues es más confiable y eficiente que un procesador jerárquico.

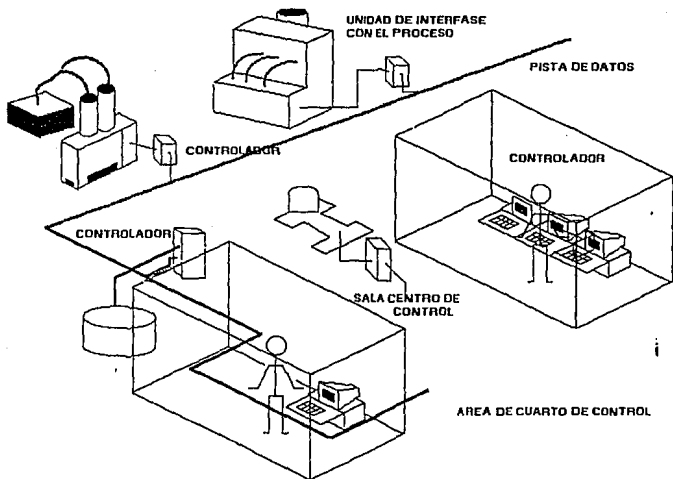
Por lo tanto, el sistema de control distribuido consiste en repartir los recursos de cálculo y control por todo el proceso, aproximándolos todo lo posible a los lugares donde se necesitan; sin embargo, estos recursos no deben ser independientes y deben pasar información al lugar de mando general de proceso, además, del almacenamiento general de información, de la supervisión y coordinación general y de la comunicación con los centros de control de otros procesos u otras secciones de la empresa. La red de comunicación entre los distintos recursos locales y la sala central de control son un elemento fundamental de este tipo de configuración (ver figura 4.1).

### JERARQUÍA DEL SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO.

Este tipo de control constituye al final sólo una parte del control por computadora que

---

<sup>1</sup> NOTA: Todos los términos utilizados en este capítulo, referidos a la ingeniería de sistemas, serán definidos en el apéndice 1.



**FIGURA 4.1 SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO.**



puede implantarse en una empresa. El resultado es un sistema de control global de todas las actividades de la misma mediante una estructura de diversos tipos de computadoras, controladores puede implantarse en una empresa. El resultado es un sistema de control global de todas las actividades de la misma mediante una estructura de diversos tipos de computadoras, controladores de regulación, *controladores lógicos programables*, minicomputadoras y grandes computadoras, incluso, computadoras personales y *estaciones de trabajo inteligentes*, conectados todos ellos por distintos tipos de comunicaciones y organizados por niveles con una estructura jerarquizada. En la figura 4.2 se presenta un esquema de esta estructura con sus niveles y funciones.

**El nivel más bajo de control local.** Tiene como objetivo el control por retroalimentación. La computadora que lo realiza tiene a su cargo la adquisición de datos de los sensores, su corrección y acondicionamiento, la comparación con los límites y generación de alarmas enviadas al nivel superior, y sobre todo, la determinación de la señal a enviar a los actuadores de acuerdo con los resultados del algoritmo de control seleccionado por el nivel superior y de acuerdo con la consigna fijada por éste. Esta computadora (mini o micro) puede controlar, a la vez, varios loops, realizar controles en cascada o de otros tipos y suele tener encomendada la actuación de arranque y paro.

A este nivel se le conoce también como nivel convencional, el cual se enfoca a la optimización de los loops de control; y está implementado mediante equipamientos como: sensores, transmisores (elementos primarios), *interfase con el proceso* y control, *interfase del operador*, algoritmos de control y auxiliares, adquisición de datos, monitoreo y manipulación de parámetros de proceso. Las tareas anteriores son realizadas empleando dispositivos basados en *microprocesadores*, estrategias de control configurables y arquitectura distribuida (figura 4.3, 4.4 y 4.5)

**El nivel de supervisión.** Comprueba también los valores de las variables y sus tendencias, generando las alarmas oportunas si sobrepasan los valores fijados, y tomando las acciones correctoras necesarias para eliminar las tendencias anómalas; hace el papel, además, de coordinación de varios controles directos de nivel inferior.

**El tercer nivel, de coordinación de área.** Tiene como finalidad el control de la producción de toda el área mediante un balance de materia y energía que se encarga de optimizar (se le conoce también por ese nombre). Según esto, se establecen las condiciones de operación de cada uno de los procesos del área, que envía al correspondiente control supervisor.

Algunos autores agrupan al nivel de supervisión y al de coordinación de área en uno solo conocido como nivel supervisorio, cuya función es la optimización de unidades de proceso donde el *CPU* desarrolla la sintonía de los SP's o salidas de control proveyendo un registro de los parámetros del proceso.

Este adapta, empleando la información del nivel convencional y la historia del proceso, estrategias de control que no pueden ser realizadas por el nivel básico (*firmware y software*). Lo

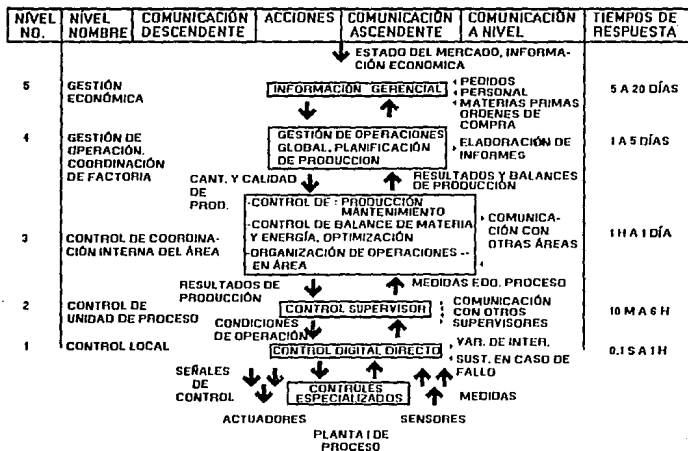


FIGURA 4.2 NIVELES Y TAREAS DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PROCESOS INTEGRAL.

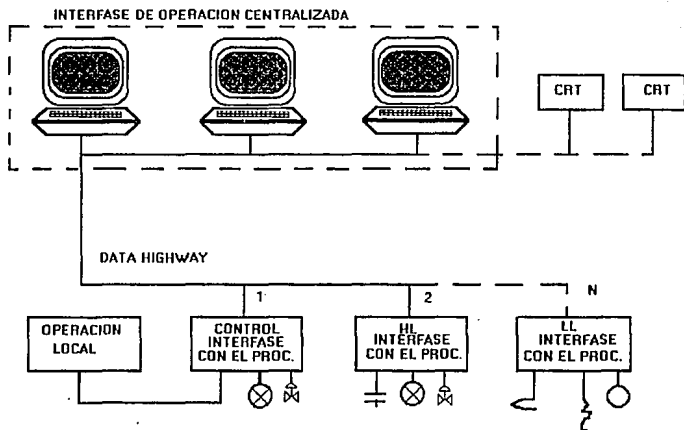


FIGURA 4.3 CONTROL DE PRIMER NIVEL

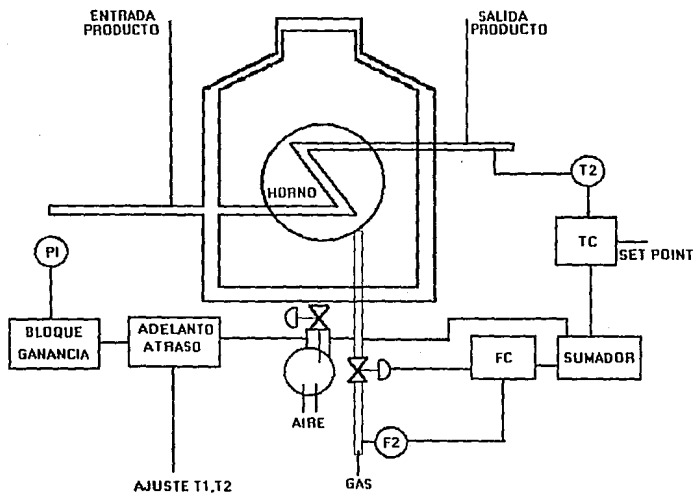


FIGURA 4.4 ESTRATÉGIA BÁSICA DE CONTROL.

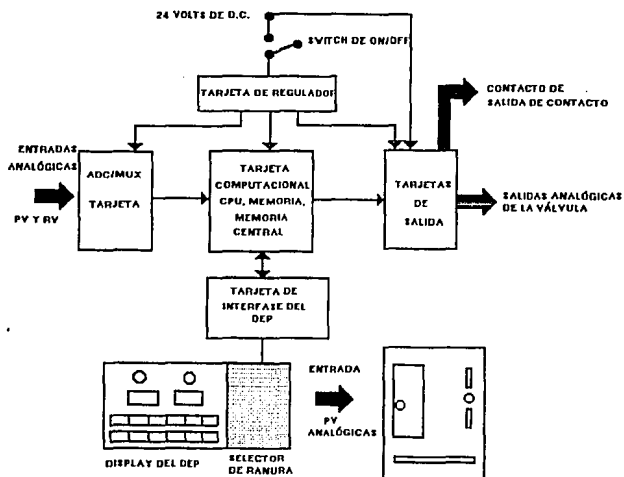


FIGURA 4.5 VISTA GLOBAL DEL FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO DEL MICROPROCESADOR

anterior se realiza mediante dispositivos basados en multiprocesadores configurables y programables, algoritmos para la linearización de variables de proceso y algoritmos de PV (variable del proceso), véase figuras 4.6 y 4.7.

**El cuarto nivel, de gestión de la empresa.** Integra todas las áreas y planifica la producción del conjunto, con la secuencia apropiada para las distintas secciones, organizando así la colaboración necesaria entre ellas.

**El nivel superior.** Finalmente, parte de una información económica: pedidos, recursos, costos y mercado, estableciendo los planes de producción y la política a seguir.

Al cuarto nivel y al nivel superior se les conoce juntos como nivel gerencial que como ya se ha mencionado, fija objetivos de producción, minimiza cambios de producción e inventarios y garantiza máxima eficiencia de producción.

La estrategia de implementación se basa en el procesamiento distribuido y centralizado, en los niveles convencional y gerencial, en los programas escritos por el usuario (en lenguajes pascal, fortran, etc.) y en la integración total de la información de la planta; cuenta con dispositivos como microprocesadores y computadoras.

## 4.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE OPERACIÓN DE UN DCS.

### ADQUISICIÓN DE DATOS.

Las señales suministradas por los sensores raramente pueden ser directamente utilizadas por el sistema para el control; es necesario someterlas a diversas transformaciones. En primer lugar, las *señales analógicas* han de muestrearse y digitalizarse de manera periódica y las *señales digitales* pueden atacar el sistema de interrupciones, o ser también muestreadas. Posteriormente, deben someterse a un pretratamiento que comprende la adecuación de unidades, filtrado, estimación de gradientes y utilizar los valores obtenidos para estimar otros que no pueden medirse directamente. Pueden incluirse aquí la compresión de datos con vistas a su almacenamiento y la agrupación de los valores y parámetros medidos en el mismo instante, con el fin de tener reunidos todos los que definen el estado de un proceso en cada momento. El almacenamiento de los datos también se encuentra dentro de esta función.

### CONTROL DE LAS VARIABLES DEL PROCESO.

Es el núcleo de todo el sistema. Involucra el tratamiento de la información obtenida por la adquisición de datos y lo hace mediante un conjunto de algoritmos, unos cooperadores y otros, mutuamente excluyentes, en cuyo caso hay que decidir cuál se va a emplear. En la base de datos correspondiente debe disponerse de los datos y parámetros que necesita cada algoritmo para funcionar, dados de antemano o ser obtenidos mediante otros programas a partir de medidas realizadas (caso de la identificación o estimación de parámetros).

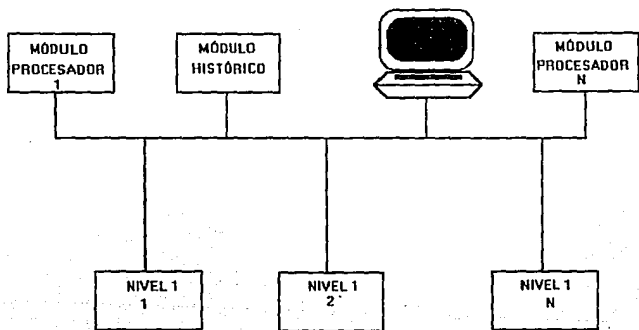
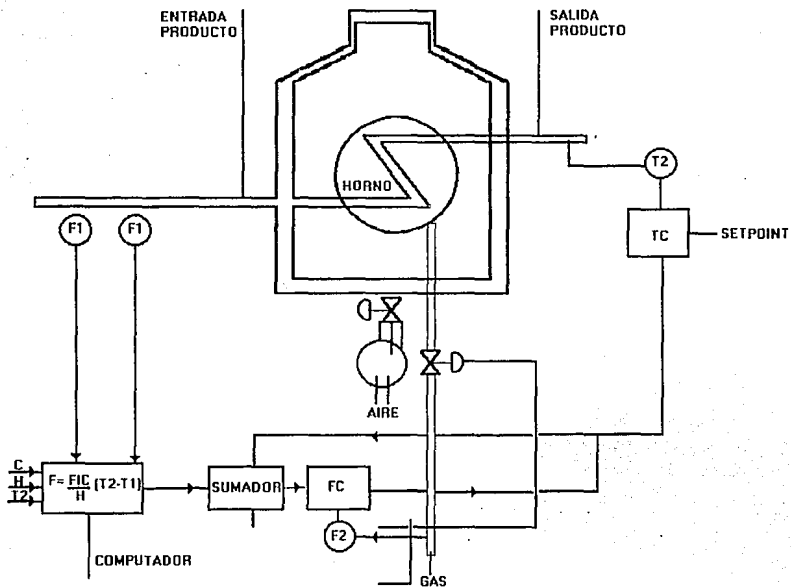


FIGURA 4.6 CONTROL DE SEGUNDO NIVEL



#### 4.7 ESTRATÉGIA AVANZADA DE CONTROL.



## COMUNICACIÓN CON EL OPERADOR.

Esta comunicación se realiza mediante dispositivos específicos, figura 4.8, situados normalmente en la sala de control, que suministra, centralizada la información procedente del resto de los componentes del sistema distribuido, después de haberla tratado convenientemente. El sistema debe ser capaz de presentar al operador, con las salvaguardias necesarias, toda la información que pueda contener de las diferentes bases de datos, así como de forma clara, el estado de funcionamiento del proceso en ese instante, y todo esto en forma global y con distintos niveles de detalle.

Además, el operador debe poder realizar una serie de acciones sobre el sistema, agrupadas de la siguiente manera:

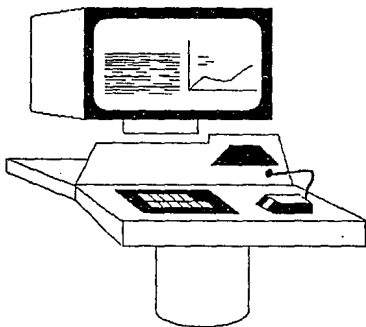
1. Inicialización o alteración de los valores de consigna.
2. Modificación de los parámetros de los algoritmos (constantes de los PID).
3. Modificación de los algoritmos (tanto de adquisición como de control) adición de otros nuevos y selección del que se quiere utilizar en cada momento.
4. Cambio de las supervisiones de control.

## SUPERVISIÓN.

Ya que el sistema está constituido por un conjunto de procesadores organizados con una estructura jerarquizada, las funciones más rápidas (y más críticas en el tiempo) se encomiendan a los niveles más bajos, mientras que las más complejas (pero menos críticas en el tiempo), quedan en los niveles superiores; como hemos indicado, de éstas últimas se encarga una computadora potente conectada al sistema distribuido. La estructura a estos niveles se concibe y programa de forma específica para cada caso empleando lenguajes de alto nivel, algunas veces, este computador de control supervisor se encarga también de la comunicación con el operador.

### 4.3 ELEMENTOS DE UN CONTROL DISTRIBUIDO.

Como hemos presentado antes, un control distribuido supone una forma o filosofía de abordar la realización de estas funciones, puesto que manejan instalaciones de costo muy elevado, deben ofrecer gran confiabilidad y estar preparados para seguir trabajando aún en caso de fallo. Además tanto los diferentes recursos como las comunicaciones, deben ser capaces de admitir la máxima carga de trabajo sin degradación en su funcionamiento, por eso, se ha evolucionado hacia un conjunto de productos tipo normalizado, conocidos como módulos y que pueden interconectarse de muy diversas formas para ajustarse a las necesidades de los procesos de cualquier tamaño. Cada módulo se presenta en una *tarjeta de circuito impreso* y para comunicarse entre ellos utilizan protocolos específicos o *buses comerciales*, mientras, que entre conjuntos de módulos empleados en procesos distintos se emplean protocolos comerciales normalizados.



**FIGURA 4.8 ESTACIÓN INTEGRAL DE OPERADOR.**

Las funciones que ha de realizar un sistema de control están asociadas con uno o varios módulos. Los módulos que realizan una función (o varias, si éstas van unidas) como es el caso de la adquisición de datos y control de variables, se agrupan en unidades físicas denominadas nodos. Estos nodos están unidos entre sí y con el computador supervisor mediante un sistema de comunicación basado normalmente en un cable coaxial capaz de transmitir información a 2 MBPS (Megabits/s) a una distancia hasta de 3 Km. tipo red local.

En el futuro, este cable será sustituido por una fibra óptica. Este sistema de comunicación se conoce como *data highway*. En la figura 4.9 se presenta un esquema de un sistema de control de procesos distribuido con tres nodos con diferentes funciones, unidas por líneas de comunicación (*data highway*) normales y de reserva (1A y 2A), cada una con su paralela de emergencia (1B y 2B).

En la figura 4.10 se presenta la estructura típica de un nodo de adquisición de datos y control. Vemos que está formado por un conjunto de módulos completamente reconfigurable según las necesidades de cada punto de la instalación, comunicándose los módulos entre sí por un bus local, mientras que el nodo se comunica con el resto de los nodos por la línea de comunicaciones redundante, a la que accede por módulos de comunicación. La figura 4.11 muestra la estructura de un módulo de entradas analógicas. Además de los *convertidores A/D* y la interfase para el bus local del nodo, incluye un microprocesador y una memoria RAM de datos donde se almacenan las medidas, cuando son perdidas por el controlador, se le envían a través del bus local, generalmente de tipo paralelo, para permitir una rápida transmisión.

La clave de los nodos del sistema de control es su *flexibilidad* para adaptarse a cada aplicación, su manejo de las redundancias y la capacidad para recuperación de errores, reconfigurándose en caso de fallo. Esta redundancia en la comunicación, puede extenderse a cualquiera de los módulos cuando sea necesario, consiguiendo una confiabilidad máxima. Por otra parte, al incrementarse la capacidad de las *tarjetas I/O* con la inclusión de microprocesadores y memoria de datos, puede reducirse el costo del cableado a los sensores, sustituyendo los cables dedicados para cada sensor por un elemento emisor/receptor trabajando con estaciones remotas de medidas con su propio microprocesador, conectadas mediante una línea digital serie, además de reducir el costo, reduce también la posibilidad de perturbaciones exteriores sobre las señales. La comunicación del nodo con la línea de comunicación del sistema se hace a través de un módulo de comunicación, redundante, encargado de todo el proceso de envío y recepción de mensajes, y que lleva a cabo la introducción de formatos, elaboración de protocolos y respuesta a ellos, detección de errores de transmisión, etcétera, todo según el modelo de comunicación adoptado.

Otros elementos de un sistema distribuido, además de los nodos con toda su flexibilidad y otros módulos, que pueden integrarse son la *estación de operador* y el *computador central*, con sus funciones supervisoras. Respecto a la estación del operador, es un módulo especial integrable con otros para formar un nodo. Este módulo consiste en una o varias pantallas (normalmente en color), teclados especializados de tipo funcional, uno o varios procesadores y una memoria local secundaria, en ella se almacena una copia actualizada continuamente, de la base de datos del procesador que se puede encontrar distribuida en los nodos, para permitir su presentación,

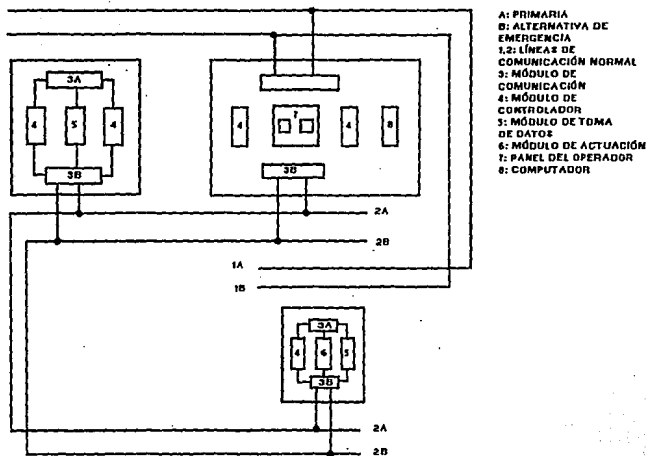


FIGURA 4.9 ESTRUCTURA FÍSICA DE UN CONTROL DISTRIBUIDO.

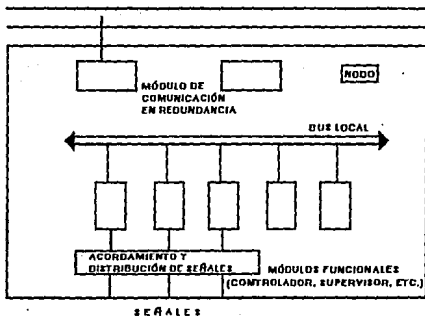


FIGURA 4.10 ESTRUCTURA DE UN NODO DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

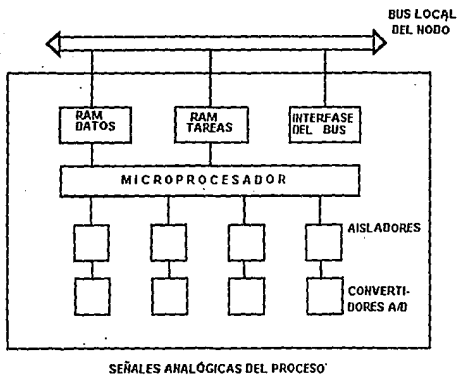


FIGURA 4.11 MÓDULO DE ENTRADAS ANALÓGICAS.

modificación, elaboración de datos estadísticos y su empleo en la etapa de arranque del proceso. Esta estructura del puesto del operador permite al sistema operar sin necesidad de un computador supervisor.

En un control distribuido el éxito del control del sistema como tal, reside en su sistema de comunicaciones, éste debe ser capaz de soportar configuraciones muy diferentes, una base de datos distribuida entre los nodos y garantizar las prestaciones adecuadas, incluso en los casos de máxima sobrecarga. Aunque la garantía absoluta no existe, se han desarrollado organizaciones del sistema que permiten trabajar en las peores condiciones; por las variedades existentes en los nodos, el sistema de comunicación debe poseer un control distribuido de sí mismo, de forma que no exista un control único y fijo de la comunicación y los mensajes no deben tener formato fijo. La estructura en estos casos de envío de mensaje es:

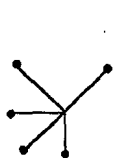
[cabecera (fuente, destino, control), cuerpo del mensaje (longitud variable), comprobación]

donde la comprobación consiste en un código de redundancia, normalmente cíclico. La comunicación entre dos estaciones de una red cualquiera ha de estar sometida a una reglas conocidas como protocolo. De los 7 niveles de protocolo existentes en la norma ISO, sólomente se han aplicado las normas existentes para los dos inferiores: el físico y el de conexión, quedando los otros a cargo de la programación específica y reduciéndose así el tiempo de comunicación.

Otro aspecto a considerar es la arquitectura de comunicación. Se agrupa en dos grandes bloques, (ver figura 4.12). El primero comprende aquellas soluciones en las que cada par de usuarios dispone para su comunicación de un canal privado. Si solamente uno de los usuarios puede comunicarse con todos, tenemos la estructura estrella (a); si cada uno puede comunicarse con todos sus inferiores, la estructura es de árbol (b); y si todos se comunican entre sí, se trata de una estructura completa (c). En los del segundo bloque, de canales de emisión, hay un canal único compartido por todos, por el que se pueden mandar mensajes globales o específico. Si este canal es abierto, se denomina bus (d), pero si es cerrado, se trata de un anillo (e).

En la comunicación punto a punto nadie puede escuchar un mensaje no dirigido directamente, cuando se hace por canales de emisión, es necesario indicar en el mensaje quién tiene acceso a él; esto supone que cualquier protocolo debe incluir métodos de acceso al canal de emisión que garanticen un emisor único y, en caso contrario, una acción de recuperación que coordine el uso de la capacidad de transmisión de todos los nodos en cada instante y que depende de la arquitectura del canal.

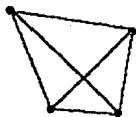
Entre los sistemas comerciales, los hay basados en bus y en anillo. El módulo de interfase al canal de cada nodo tiene su buffer de mensajes de paso y otro para los propios en cola de espera para ser enviados. Un mensaje que entra al bus desde el nodo originador, pasa al siguiente y va de nodo a nodo hasta que llega al destinatario, éste lo devuelve siguiendo el bus con un código de aceptación. El mensaje sigue hasta volver al emisor, al recibirlo con la aceptación lo destruye, así



A) ESTRELLA

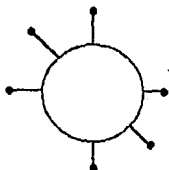


B) ÁRBOL



C) COMPLETO

D) BUS



E) ANILLO

FIGURA 4.12 ARQUITECTURAS DE COMUNICACIÓN



como la copia de seguridad que guardaba. Se considera que el retardo de un mensaje a través del bus, cuando hay sobrecarga, no debe pasar de los 15 microsegundos; por su estructura pueden procesarse 100 mensajes/s de una longitud de 64 bytes con un canal de banda coaxial de 50 Mhz<sup>2</sup>. Las técnicas de acceso más utilizadas son las de acceso controlado, para eso se emplea el paso de señal que sólo permite un nodo activo en el bus (token bus). En el bus se envía cada vez requerido, un mensaje con un destino y se pasa la señal a otro nodo para que proceda de la misma forma. En el anillo la interfase se muestra activa sobre los mensajes. Si es de paso de señal, puede estar a la escucha o en emisión, desviando entonces la información que llega; si es de inserción de registros, pueden circular varios mensajes a la vez, gracias a la introducción de un retardo entre mensajes. También se han desarrollado técnicas de reconfiguración del sistema de comunicaciones para los casos de fallos en los canales de comunicación.

Finalmente, una solución poco empleada por su falta de confiabilidad, es la existencia de un controlador central de comunicaciones que actúa como árbitro de acceso. Una variante es realizar agrupaciones de nodos de fácil comunicación entre sí, comunicándose con otros grupos a través de canales globales a los que se accede por módulos especiales, tipo puerta de conexión. Se trata de un desplazamiento de jerarquías entre nodos apoyados en las comunicaciones.

#### 4.4 SISTEMAS DE CONTROL DISTRIBUIDO.

Existe hoy día en el mercado una amplia gama de estos productos aparecidos en su mayoría, en los últimos 7 años. Solamente son anteriores el sistema TDC 2000 de Honeywell, que fue el pionero en 1975, y el Contronic 3 de Hartmann Braun. El primero ya está sustituido por el nuevo TDC 3000, mucho más avanzado. Algunos sistemas más importantes son:

##### 1. Analog Devices Inc.

Recientemente presentó su sistema MACSYM formado por estaciones de trabajo para los puestos de operador (MACYM 120 Y 150), tarjetas I/O (microMAC 4000) unidades programables en alto nivel (microMAC 5000), un sistema de comunicaciones (MCComm) un lenguaje de programación (MACBASIC), soporte lógico para presentación de información (DAIS), y para interfase con el operador (MAS), y acondicionadores de señal de diferentes tipos. El microMAC 5000 puede configurarse a la medida de las necesidades, mediante una familia de tarjetas I/O y es conectable a cualquier computadora. Además, su programación puede hacerse de una terminal no inteligente, ya que el MACBASIC contenido en el microMAC 5000 y microMAC 4000 se encarga de su mando.

##### 2. Hartmann & Braun.

Ofrece todos los componentes para realizar un sistema de control de un proceso de cualquier tamaño; desde los sensores, a los actuadores, con diversas opciones respecto a la

---

<sup>2</sup> "Sistema DCI-5000". Configuración de operación de un sistema comercial basado en un bus de datos (Fisher & Porter, 1978).

estructura de control. Para el caso de pequeños procesos dispone de su sistema centralizado Protronic, con indicadores, controladores, registradores, etcétera, que también pueden emplearse en los sistemas distribuidos: Contronic 3 y Contronic P.

El primero de estos dos, está destinado a las centrales productoras de energía, las cuales se conforman de dos partes:

- La pasiva, con el sistema de información de la central productora y la central de operación, y

- La activa, con todos los elementos del loop de control: acondicionamiento de señal, regulación, control secuencial y lógico, ampliación de potencia para atacar a los actuadores.

Las diferentes áreas activa y pasiva están unidas por un canal de comunicación serie. El Contronic P es un sistema totalmente distribuido, integrado por 126 estaciones de proceso, una o varias estaciones centrales, una estación coordinadora y una estación de interfase a un computador de supervisión, gestión o planificación y todas ellas unidas por un bus serie formado por un par coaxial de hasta 4.5 Km.

Las estaciones de proceso son totalmente configurables y autosuficientes y pueden tener 12 loop de control y 128 controles lógicos, vigilar 256 funciones analógicas o 512 binarias o una combinación de ambas.

### 3. Controle Bailey.

Ha desarrollado su sistema micro Z que susituye el control centralizado que ya poseía, capaz de trabajar con sus componentes. En lo referente a los puestos de operación, posee puestos reducidos para pequeñas unidades, coexistentes con los de la sala central de control de hasta 15 operadores. Dispone de una gran variedad de paquetes de programas para presentación de todo tipo de resultados, tratamiento de información y programas de aplicación, incluida la identificación de procesos. Los diferentes puestos se unen entre sí mediante un bus redundante del que también cuelgan el computador de supervisión y los concentradores de información, que pueden estar duplicados por redundancia. Las tarjetas con los controladores, unidades de medida y controladores lógicos programables, están conectadas cada una a dos concentradores. Pueden coexistir varios sistemas micro Z con su bus propio, puestos de operación, etc., y coordinarse todos ellos uniéndose a una computadora supervisora única.

### 4. Foxboro.

Ofrece sus sistema Spectrum, compatible con su sistema anterior, del que formaba parte los Spec 200 como reguladores, los puestos de operador Videospec y los computadores Fox 1A y 3. La comunicación se realiza mediante la red Foxnet, basada en un cable coaxial redundante de hasta 4.5 Km, a ella se conecta mediante puertas de unión, de las que puede haber hasta 10, los puestos centrales y los dispositivos de control local (antiguos y modernos), a través de una

estructura jerarquizada. A cada puerta de unión se pueden conectar hasta 10 módulos de control de comunicaciones, unidades microSpec, consolas locales, multiplexores o módulos de entrada analógicas. El microSpec es el nuevo módulo de regulación, con capacidad para 30 loops de control analógico o 120 digitales; basado en el microprocesador por módulos AM 2901 de AMD. Según Foxboro, puede tener totalmente a su cargo el control de una destiladora. La sala central de control estará constituida por módulos Videospec, Fox 1A y 3, donde se presentan la evolución de las variables del proceso, alarmas (para las que puede existir una pantalla especial), gráficos sinópticos de la instalación, etc. El Fox 3 tiene a su cargo la gestión integrada de la instalación. El Fox 1A puede conectarse hasta con 4 redes diferentes para integrar diferentes procesos o instalaciones. La programación se realiza mediante el lenguaje FPB de Foxboro, de tipo Basic.

## 5. Siemens.

Tiene un sistema, Teleperm M, apoyado en una estructura de bus compleja; dispone de tres tipos de buses, uno utilizable hasta 20 m. para unir tarjetas o equipos en el interior de armarios, un segundo constituido por varios de los anteriores unidos por módulos de aislamiento eléctrico, llegando a los 100m. y el bus de distancias, hasta 4 Km. El acoplo entre buses se realiza mediante convertidores, cuando tienen el mismo tráfico de datos y por acopladores de bus cuando sus tráficos son independientes, intercambiando información de una manera selectiva al recibir un código de tipo dirección. Con esta estructura pueden unirse varios buses largos con información independientes. El control del tráfico está totalmente descentralizado y descansa en las interfaces, lo que aumenta la seguridad.

La regulación está a cargo de 3 tipos de sistema similares, autónomos y de complejidad creciente: AS 210, AS 220 y AS 230. Posee un bus interno, al que se unen acopladores de multiplexor, unidades de entrada, de salida, memoria RAM y EPROM, controladores manuales, acoplador de disco flexible, acoplador de consola e impresora local y acoplador de bus externo. Para la sala de control, existen varias posibilidades según la potencia de cálculo, la unidad de presentación y el número de buses empleados.

## 6. Honeywell.

Dispone posiblemente, del más moderno sistema descentralizado de control, puesto que ya es una segunda generación, el TDC 3000, es capaz de realizar de forma descentralizada y a la vez integrada, todo el control de una fábrica.

Se basa en la unión de distintos canales de transmisión, principalmente la red de control local y el canal de datos. Ambos se conectan por una puerta de canal. Dispone de otros acopladores:

- De computador para conectar la red local, a los computadores de dirección y control de producción, etc.,

- Genérica, para otro tipo de redes;
- De extensión, para realizar comunicaciones a larga distancia mediante fibra óptica;
- De procesador, para tener acceso directo al procesador del canal de datos;
- De conexión, para conectar varias redes de control local.

A la red de control local se conectan directamente las estaciones universales, que pueden poseer muy distinta complejidad, y los módulos de historia, de aplicación y de cálculo. Al canal de datos se conectan los controladores, de los tres tipos: básico, ampliado y multifunción; también los controladores lógicos programables, éstos a través de puertas al canal de datos; las unidades de interfase de proceso de bajo nivel, alto nivel y baja energía, e incluso las estaciones universales de operador. Describir en detalle cada uno de estos equipos queda fuera del alcance de este trabajo.

Existen otros sistemas descentralizados en el mercado, algunos de aparición muy reciente:

- Anaconda Advance Technology Inc (Anatec), dispone de la familia CRISP con los nuevos sistemas de bajo costo DRM/Dynaram, basados en el procesador DEC J-11 y Crisp/Micor, basado en el procesador DEC Micro/PDP-11.

- Bailey Controls tiene el Sistem 7000 y el Network 90, con base de datos distribuida y programable en basic.

- ASEA tiene el ASEA Master, con su familia de controladores de proceso y lógicos programables Master Piece 010, 100 y 200 que, junto con el Master Aid para la programación y el Tessalator para la presentación de información y comunicación hombre-máquina en la sala central de control, le permite construir grandes sistemas distribuidos.

- Beckman, con su División Process Instruments and Controls ha sacado el nuevo RMV 9000, basado en el anterior MV 8000. Su elemento crucial es la nueva MVCU (unidad de control multivariable) capaz de sofisticados esquemas de control.

- Camberra Industries Inc. ha sacado el System 50 de la serie IMACS, capaz de comunicarse con el equipo central System 90.

- Clemensy tiene el Syproc jerarquizado en tres niveles, utilizando procesadores de Intel y Motorola.

- Computer Products dispone del sistema TDC, con un paquete de acceso y gestión de base de datos centralizados o distribuidos, y del sistema centralizado RTP plus.

- Fisher and Porter tienen el sistema DCI-4000, basado en el LSI 11 de digital, con programas especiales y reguladores analógicos, digitales o mixtos y estructura totalmente descentralizada y acaba de presentar el Micro MCI, más adaptado a pequeñas aplicaciones.

-Process Systems fabrica el sistema Micon MDC-200 ha cedido su licencia de fabricación a DRD Mess und Regeltechnik. El MCD-200 consiste en reguladores Micon configurados por un bus interno y unidades de entradas analógicas (15), lógicas (16), salidas analógicas (8) y digitales (8), memorias PROM y RAM, unidades de presentación y entradas de órdenes, microprocesador, y las interfaces de comunicación lateral (con otros Micon) y vertical (con el bus de datos). El bus de comunicaciones está constituido por una unidad principal a la que se conectan las consolas, hasta 4 unidades esclavas, de cada una de las cuales pueden colgarse hasta 8 reguladores Micon, y los módulos de teclado, impresores, conexión a computador de control y registradores.

-Eurotherm/TCS tiene el sistema 6350 cuyo núcleo es el regulador 6350, con entradas y salidas lógicas y analógicas, unidad de presentación, teclado, unidad central, basada en un 9980 de Texas, 16 bits y memoria ROM. Como unidades de adquisición específica están el 6432 y 6350 que se conectan al computador de supervisor a través del bus. Ambos pueden funcionar independientemente de la computadora, no así la consola y el teclado, que no van unidos al bus, sino directamente al computador.

-Taylor Instrument-Sybron dispone del sistema Mod III, formado por armarios de control (8 como máximo) cada uno de los cuales puede contener 64 controladores de loop. Cada controlador de loop tiene un microprocesador y forma el módulo SLMC con su teclado especializado. Además de las funciones normales, puede realizar una regulación con ganancia adaptativa.

-Sereg-Schlumberger ofrece el sistema Modumat 800. Cada 8 loops están controlados por un microprocesador Z-80 por lo que denominan RMC (regulador multiloop configurable).

-Leeds & Northrup dispone de una nueva versión mejorada del sistema MAX 1 más modular y compatible con la versión anterior, dispone de un canal de comunicaciones por fibra óptica.

-Westinghouse Electronic Corp. tiene su sistema WDPF también mejorado, con su lenguaje gráfico para descripción de loops y esquemas de control secuencial, además de la unidad RTC (centro técnico remoto) para acceso por teléfono de expertos al sistema de control de la planta, para el diagnóstico, y entrada de órdenes por voz.

-Yokogawa Hokushin Electric acaba de presentar su sistema CENTUM con un bus de paso de señal al que pueden conectarse hasta 32 estaciones de control y vigilancia, y con consola de operador con gran diversidad de presentaciones.

-Valmet tiene el sistema Damatic 64 con dos tipos de buses, uno de la sala de control y otro de procesos, conectados ambos entre sí por una estación de control y otro de tráfico.

De las casas españolas, merece la pena destacar a ENSA con su sistema de Radiocomunicaciones para Telecontrol EN/FSQ-600, consta de un Centro de Control unido por radio a Unidades Repetidoras de Radio que a su vez, pueden estar unidas a otras o a unidades

llamadas Puntos de Medida y Actuación, dotada de sensores, actuadores y alarmas. También Cero-Sielco con su EMDS (sistema modular de control distribuido), sirve de base al sistema SIELCO 850, destinado a Telemedida y Telemando.

## **ELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO.**

Como se mencionó en el capítulo 2 han surgido nuevos sistemas de control distribuido debido a las necesidades en los diferentes tipos de procesos. Por ejemplo; el TDC-3000 de Honeywell está especializado para uso en refinerías, el Rosemount System-3 y el Texas Instrument D/3 se usan en procesos batch y para procesos continuos podemos citar al Foxboro I/A y al Fisher Provox entre otros.

Actualmente muchos fabricantes de equipo de instrumentación buscan la estandarización de sus sistemas de control distribuido siguiendo los estándares de los sistemas más poderosos; un ejemplo de ello es "Keystone" (industria de válvulas y actuadores) quien diseñó su propio DCS adaptable a los sistemas de Foxboro y Honeywell.

En el campo de los equipos de control distribuido, no existe uno mejor que otro, con esto queremos enfatizar. la aplicación de los mismos está en función de su costo, confiabilidad y tamaño, lo cual no es tan importante para este caso de estudio, pues el objetivo es conocer y aplicar un DCS a un proceso industrial basándose en las filosofías de control e instrumentación básicas.

De este modo, la elección del DCS en estudio sólo se llevó a cabo tomando en cuenta la calidad de la información recopilada de tal forma que permitiera:

- Describir de manera completa un sistema de control distribuido (DCS)
- Visualizar su arquitectura
- Especificar equipamientos periféricos
- Especificar su sistema de comunicación, y en general la operación del mismo.

### **4.5 SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO DCI-4000.**

El DCI-4000 es un sistema de control distribuido real. Las funciones del proceso en su totalidad quedan divididas en muchos sistemas y componentes que aprovechan la flexibilidad operativa y la confiabilidad; reducen los costos del sistema y la conveniencia de la aplicación se ve mejorada, hay dos aspectos en la distribución, el geográfico y el funcional; un sistema distribuido permite unidades instaladas en la forma más lógica dentro de áreas de proceso en planta. Las unidades de control se localizan para minimizar el alambrado de la instalación y por ende sus costos, así como el equipo de interfase operador-proceso localizado en el área de operación más conveniente. La distribución también permite que los sistemas se dividan entre componentes unitarios para confiabilidad del sistema y una aplicación de mayor flexibilidad.

Adicionalmente a los beneficios de la distribución el DCI-4000 está diseñado específicamente para control con énfasis en la instrumentación de procesos. Consecuentemente, el usuario queda equipado con una variedad muy grande en componentes de sistemas flexibles fácilmente adaptables a los requerimientos específicos de control de procesos. Las características del sistema son particularmente evidentes en áreas que requieren una identificación característica en el desempeño y mejoran el comportamiento del proceso en planta, a través de un control más estricto. La implementación del control combinado, tanto *control secuencial* como analógico, y la rápida modificación del control de proceso, así como sus esquemas, se han simplificado para el usuario.

El DCI-4000, en muchas formas es mucho más fácil de entender y más fácil de aplicar que la instrumentación electrónica convencional

Los *displays* o despliegues del operador emplean formatos de tiempo probado los cuales simulan la instrumentación convencional y el teclado de control permite al operador una actuación directa. Independientemente de los requerimientos operativos básicos existen muchas ventajas más que le permiten al operador un rápido acceso a la información de proceso.

#### JERARQUÍA DEL DCS DCI-4000.

El DCI-4000 está basado en un concepto jerárquico de control distribuido. El nivel básico conecta por la interfase directamente al proceso y lleva a cabo todas las funciones necesaria para mantener el control de los procesos en base "Stand Alone" incluye:

1. El monitoreo y el acondicionamiento de todas las entradas del proceso.
2. La verificación de los límites de alarma.
3. El control digital directo.
4. El control secuencial y cíclico.

El nivel básico del controlador es la *unidad de control distribuido* (DCU). El DCU está disponible en tres versiones para satisfacer los requerimientos específicos del proceso, y todos se localizan normalmente tan cerca del proceso como sea posible para minimizar las trayectorias de alambrado y los costos de instalación.

En el nivel básico una *consola local del operador* (LOP) permite el acceso al operador a la unidad de control distribuido. Las LOP y la DCU proporcionan una operación completa en un proceso, cuyo funcionamiento es análogo al de un tablero de control de instrumentación analógica.

Las comunicaciones de la unidad de control distribuido a nivel superior, se efectúan por medio del *data highway*. El cual es un sistema de comunicación sofisticado por medio de dos alambres de tipo coaxial mediante el cual una gran cantidad de información pasa a velocidades altísimas de un dispositivo a otro.

Los niveles de la *consola central del operador* (COP) quedan definidos para características de dirección y planeación del proceso. La COP proporciona acceso a un mayor número de unidades de control distribuido, tantos como la distancia que los separe del loop, y ofrece al operador ayudas adicionales, tales como despliegues gráficos del proceso, tiempo real, análisis de tendencia, etc. En tales condiciones podrán localizarse un número finito de unidades centrales de operación en un data highway para proporcionar centros de operación múltiples.

Adicionalmente a la comunicación con la consola central del operador el data highway proporciona los medios de comunicación con sistemas de computadora como la serie 4000 de Fischer & Porter. Alternativamente, el usuario final puede conectar otra computadora a través del modem adecuado, éste último es un buffer en el data highway que permite el acceso a la base de datos distribuidos. El nivel supervisorio puede emplearse para mayores sistemas y estrategias de control, involucra balances de materiales, ajustes de optimización, decisiones de administración de energía y movimientos de productos. En este nivel, se usan las computadoras de las áreas de proceso y su función primaria con sistemas de información de tipo gerencial.

El DCI-4000 ofrece una gran variedad de componentes seleccionados para aprovechar el nivel requerido de control y monitoreo. Sus sistemas requerirán de todos los componentes que presenta el control distribuido.

## LA FAMILIA DE UNIDADES DE CONTROL DISTRIBUIDO.

La unidad de control distribuido tiene tres versiones:

La *unidad de control analógico* (ACU) que se emplea para procesos continuos, cuyas variables son del tipo del flujo, presión y temperatura con una capacidad máxima de 16 circuitos. Adicionalmente la función del controlador es la de proporcionar una mayor selección de acondicionamiento de señales con funciones de cálculo.

La *unidad de control multifuncional* (MCU) es para aplicaciones en controles cíclicos que requieren capacidad de secuencia combinada con controles continuos: La MCU, incorpora todas las funciones de la ACU, y adicionalmente la capacidad de entradas y salidas digitales en 144 y 128, respectivamente, para control secuencial.

Las unidades de proceso para barrido (PSU) son para aplicaciones que solamente requieren comunicación de datos con el data highway. La PSU tiene un número mucho mayor de entradas y salidas comparativamente a los ACU y MCU e incluye el acondicionamiento de señal en capacidad de cálculo de las otras dos unidades.

Las unidades de control distribuido tienen los atributos de la instrumentación en la forma de *controlware*. El controlware es un sistema de "programación" a través de módulos tales como extractores de raíz cuadrada, controladores y módulos de cálculo en general, diseñados para la ingeniería de instrumentación de proceso y cuya implementación en los esquemas de control son fácilmente configurables a través de su terminología.



Los módulos de controlware quedan ensamblados constituyendo circuitos a partir de los procesos definidos. El acondicionamiento de los módulos del controlware es análogo al alambrado electrónico de un tablero de control de instrumentos analógicos. Los requerimientos de alambrado se reducen mediante la unidad de control distribuido que tiene una capacidad de módulos, permite un sistema sofisticado de alambrado con los sistemas de control específicos para cada proceso. La unidad de control distribuido puede también presentarse en una versión menor con una capacidad de 8 circuitos.

Las *tablillas terminales para cliente* (CTB) son los medios de comunicación con la instrumentación de campo a la unidad de control distribuido. Existen varias versiones para distribuir las diferentes señales de entrada-salida de nuestro proceso. Las CTB se conectan a la DCU por medio de cables especiales en cada aplicación particular.

Como respaldo para la unidad de control distribuido, si se desea, pueden proporcionarse estaciones manuales, conectadas entre la unidad de control distribuido y la tablilla terminal para el cliente. Alternativamente las DCU pueden tener una DCU adicional como respaldo, donde la operación manual no sea aplicable en los procesos.

#### **INTERFASE OPERADOR-PROCESO.**

Existe gran variedad de instrucciones en la consola del operador en el sistema DCI-4000 para satisfacer los requerimientos independientes de la interfase proceso-operador. Estas instrucciones están basadas en despliegues de *tubos de rayos catódicos* (CRT) orientados hacia el operador, y hacia sus teclados

Todos los despliegues del CRT pueden estar constituidos por un circuito analógico sencillo o una representación compleja de todo un proceso implementado, mediante las diferentes líneas del usuario. Todas las interfases operador-proceso han sido diseñadas para efectuar funciones similares de operación confiable.

#### **CONSOLAS DEL OPERADOR.**

La consola local del operador (LOP) sirve como interfase operador-proceso a las unidades de control distribuido y su capacidad máxima es de hasta 4 unidades de control distribuido. La LOP proporciona despliegues de las variables de proceso, puntos de ajuste, status de los controladores, salidas de los mismos y status de secuencia para propósitos de procesos cíclicos.

La LOP es una interfase de proceso sofisticado pero económica con su diseño basado en un constante enlace con el operador dentro de un ambiente de "cuarto de control". Los despliegues nitidos en blanco y negro del tubo de rayos catódicos presentan información analógica con despliegues simulados de medición, así como lecturas digitales adicionales. Los botones funcionales mayores están orientados para conveniencia del operador, diseñados inicialmente para el operador, el ingeniero puede también apreciar la flexibilidad en la aplicación de los despliegues de CRT, y las características convenientes del sistema de control para propósitos de modificación

durante la etapa inicial de arranque de los procesos en cualquier operación.

Una LOP con su DCU representa todas las funciones de un tablero de control convencional y además de las características necesarias de éste, las convenientes de un sistema de control distribuido con interfase de operación primaria.

Como una interfase auxiliar a la operador-proceso la LOP lleva a cabo muchas funciones en sistemas de distribución mayor, tales como proporcionar información extra a los operadores para las emergencias de arranque, y ofrece los medios de la responsabilidad de operación distribuida, pueden aplicarse convenientemente hacia áreas remotas en la planta o para respaldo, pues no forma parte del sistema data highway.

La consola central del operador (COP) es una interfase mayor a través de un CRT a colores. Incorpora todos los despliegues de función de la consola local del operador con la representación de datos analógicos controladores, circuitos cíclicos, secuencia y demás, con despliegues idénticos comunes. El botón de secuencias común también es idéntico, pero permite el acceso a una mayor porción de los procesos en la planta.

La COP conecta hasta 16 DCU's en el data highway. Estas 16 DCU's pueden aparecer en uno o varios data highway's es decir, permiten la flexibilidad de hacer una rutina de muestreo en los diferentes procesos de la planta, una COP puede emplearse en lugar de una LOP o adicionalmente con ella para propósitos de operación centralizada. Con acceso hasta 16 unidades de control distribuido en lugar de cuatro, muchas operaciones unitarias pueden combinarse en el centro de operación. La COP puede también localizarse a una distancia mucho mayor del DCU a través del data highway (hasta 2 kilómetros) con las ventajas consecuentes. El eslabonaje del Data highway permite 2 o más COP comunicándose con el mismo DCU y satisfacer los requerimientos de operación para uno o más centros de operación de tipo redundante.

Una COP puede estar equipada con más de un CRT para permitir despliegues simultáneos de varios tipos de información. Muchas características de operación son configurables para permitir al operador una mayor versatilidad respecto a sus requerimientos. Es un sistema que permite simultáneamente desplegar niveles de sumario, análisis de tendencia unitarias, y un registro y manejo de datos.

El paquete de gráficos del CRT, permite al usuario final la generación y la modificación de gráficas en línea, no se requiere programación para este sistema, el paquete de manejo de datos permite una libertad total para la operación a través de formatos e incluye las provisiones para la generación futura de formatos mediante despliegues periódicos. Existe también un paquete de cálculos que permite la manipulación de los datos desde el centro de operación.

La COP ha sido diseñada por ingenieros para la implementación. No se requiere ninguna experiencia en programación para implementar las diferentes características que ofrece el DCI-4000. La CPO puede comprarse como *hardware* o como paquete con software e implementarlo totalmente para el usuario final.

## **SISTEMA DE COMPUTADORA.**

Un sistema de computadora puede interconectarse al sistema DCI-4000 a través del data highway. Esto puede ser:

1. La computadora de la serie 4000 de Fischer & Porter.
2. Sistema independiente.

El sistema de computadora puede emplearse en lugar de, o en conjunción con la COP en el DCI-4000. El sistema de computadora Fischer & Porter series 4000 proporciona todos los despliegues operador-proceso que se enlistan en las características de una COP.

Consecuentemente puede servir como centro de operación computacional o de manejo de datos o para separar las funciones de computador supervisorio de los centros de operación. En este caso el sistema de computadora, debería suministrarse con un número de interfaces de operador y el centro de operación quedaría establecido utilizando unidades de control centrales.

El sistema de computadoras series 4000 proporciona capacidad de multiprogramación a tiempo real con las facilidades del desempeño de los programas en línea. Los programas del usuario final pueden implementarse utilizando lenguajes familiares como fortran y basic. En suma, es factible también la compilación de programas orientados. Es de particular interés, la diferencia en necesidades que el lenguaje de procesos para sistemas cíclicos, crea para propósitos de programación y es sensiblemente menor cuando se implementa la aplicación con la estrategia de la unidad de control distribuido específica; comparado con procesos tradicionales implementados sin la DCU.

La computadora serie 4000 por su versatilidad satisface todos los requerimientos por específicos que éstos sean. La versión más pequeña es esencialmente la COP con capacidad de programación seguida de una computadora mayor cuya configuración permite cualquier grado de supervisión de proceso, optimización y procesamiento de datos.

## **TERMINAL DE ALMACENAMIENTO Y SEGUIMIENTO.**

La terminal de almacenamiento y seguimiento (SFT) se emplea para la interconexión de las computadoras al data highway, permite el acceso a la base de datos del control distribuido DCI-4000 y proporciona también la traslación de los buffers de los protocolos de los datos de mensaje.

Mediante el suministro de buffers para el almacenamiento entre el data highway y la computadora, la SFT minimiza el tiempo de carga en el sistema de computadora a través de interrupciones más pequeñas y aumentando la eficiencia de transferencia de datos.

Mientras que el data highway usa el esquema de transmisión de datos o intercambio de los mismos en serie con la computadora (HDLC), la transmisión contiene instrucciones de la

información de rutina de los datos de acceso, y la detección de los errores de transmisión. La SFT suma a esta información los datos recibidos de la computadora antes de la transmisión, así como la información de los datos vertidos por el data highway antes de transferirse a la computadora. Así, el intercambio entre la SFT y la computadora puede ser una forma de protocolo periférico tradicional para la computadora empleada particularmente.

## **DATA HIGHWAY.**

El data highway es el medio de comunicación entre los diferentes componentes del sistema DCI-4000. El data highway en sí, es un cable equivalente a un par de alambres con una relación de transmisión. La parte operativa real del sistema del data highway, es la comunicación entre los dispositivos del sistema de control distribuido.

Todos los dispositivos del sistema de control distribuido DCI-4000 conectados en interfase al data highway tienen dos tarjetas de posición de circuito para la comunicación del data highway, es decir, el data highway es de tipo redundante. Toda la información de proceso se pasa a través de la unidad de control distribuido, cada DCU transmite al data highway solamente en respuesta a la transmisión direccionada a un dispositivo de nivel mayor.

La COP y el sistema de computadora pueden iniciar la transmisión a la unidad de control distribuido cualquiera que sea, y recibir la respuesta e interpretarla. Cada data highway puede soportar hasta 16 DCU's y una combinación de sistemas de computadora y COP. El protocolo asíncrono permite el tiempo compartido a través del data highway de dispositivos de nivel superior.

Cada uno de los dispositivos de nivel superior es totalmente independiente, de tal forma que su falla no representa efecto en los demás. El data highway puede protegerse ulteriormente mediante la implementación de un sistema dual. Esto aprovecha la característica de diseño de sus dos tarjetas de intercomunicación para cada uno de los dispositivos para que trabajen independientemente en el proceso.

## **UNIDAD DE CONTROL ANALÓGICO (ACU).**

La unidad de control analógico es el controlador fundamental del sistema de control distribuido DCI-4000. Su aplicación primaria es la de controlar procesos continuos para sus variantes. La ACU es también una de las componentes de la distribución modular del DCI-4000, se puede localizar a una distancia conveniente del proceso y efectuar así la medición de un control a través de los elementos de campo.

La ACU se interconecta con otros componentes del DCI-4000, para formar un sistema operativo completo. Esta es una versión de una familia de unidades de control distribuido basada en microprocesadores. La unidad de control distribuido (DCU) está disponible en tres versiones, como se muestra en la figura 4.13.

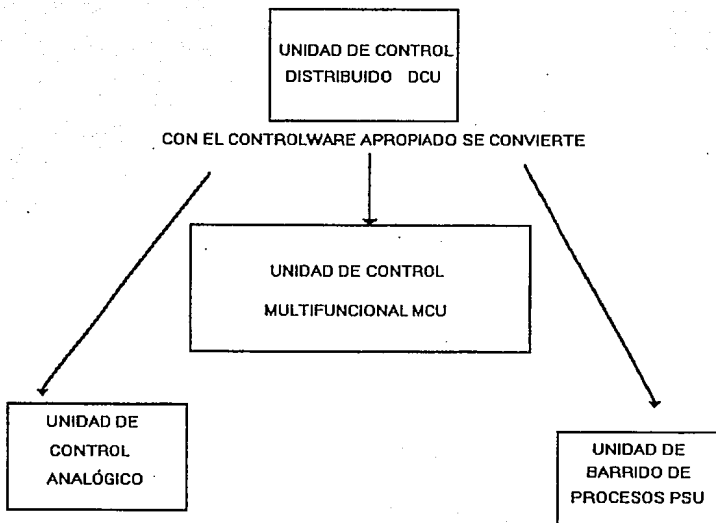


FIGURA 4.13 DISPONIBILIDAD DE LA UNIDAD DE CONTROL DISTRIBUIDO.

La unidad básica es idéntica física y eléctricamente. La caracterización para una versión específica se lleva a cabo cuando se le proporciona el sistema de *multiplexado* de entrada-salida adecuado, así como el software correspondiente.

La ACU se emplea para control de procesos continuos en sus variables como: flujo, presión, temperatura, pH, etc. Tiene una capacidad de hasta 16 loops. Adicionalmente a las funciones de control, esta provista de una gran selección de acondicionamiento de señales y funciones de cálculo.

La unidad de control multifuncional (MCU) es para aplicaciones que requieren secuencias además del control de procesos continuos. Incorpora todas las funciones de la unidad analógica de control más funciones de secuencia para procesos cíclicos y/o incrementales.

La unidad de barrido de proceso (PSU) se aplica en procesos con los que únicamente se requiera una comunicación con los canales de alta velocidad y una capacidad mucho mayor entrada-salida que la ACU o la MCU, incluye el acondicionamiento de señal y las capacidades de cálculo de las otras dos unidades.

La ACU ha sido diseñada para la ingeniería de instrumentación de procesos. Aunque el diseño se basa en un microprocesador, el enfoque requerido para aplicar la ACU es el de la instrumentación y control de procesos. El ingeniero es libre de concentrar sus resultados y necesidades, independientemente de las necesidades de las funciones que tienen lugar detrás del tablero.

El concepto único involucrado a esta unidad son los módulos de software, reemplazan a los instrumentos analógicos denominados hardware. Si bien éste no es un concepto difícil de efectuar, ayudará más si se enfoca a la ACU como un módulo sustituto del tablero de control con todas las funciones disponibles con sus aplicaciones. Existen dispositivos de acondicionamiento de señal que proporciona funciones como extracción de raíz cuadrada y linealización de termopares. Existen controladores, estaciones de relación, sumadores-restadores, multiplicadores-divisores, selectores de señal, contadores-acumuladores, relevadores de alarmas, etc.

Todos estos instrumentos existen en la ACU como módulos de software, se interconectan como si fueren instrumentos de tablero convencionales y funcionan casi exactamente como el hardware. Los instrumentos de tablero son alambrados para construir circuitos de control. Los módulos de software se alambran por configuración mediante instrucciones emitidas a través de un teclado operativo alfanumérico, exactamente de la misma manera.

Cada unidad de control es suministrada con una cantidad de módulos de software químico y reciben el nombre de controlware. Se cree que no se trata de dispositivos tangibles, es importante decir que no existen, y que cada módulo está configurado independientemente de los demás. Cada módulo de software permanece como un dispositivo independiente hasta que el ingeniero instrumentista establece una relación entre él y el resto de los módulos a configurar y así

satisfacer las necesidades de proceso. Y debido a que configurará sistemas de hardware, debe seleccionarse el módulo de entrada para acoplar un instrumento primario específico, así como el módulo de salida que deberá ir dirigido al elemento final de control específico.

Los módulos de software llevan un orden predeterminado; el primero tomará un modo analógico de salida, posteriormente un modo analógico de cálculo, efectuará las características analíticas involucradas y finalmente nos remitirá a un módulo analógico de control, quien a su vez emitirá una señal de decisión al campo por medio de un elemento de software denominado módulo analógico de salida, y en esta forma un control o circuito de control quedará computado.

El controlware está diseñado para una capacidad ideal de 16 circuitos de flujo de gas compensados por presión y temperatura, pero los circuitos en cascada requerirán de dos módulos de software de control. Bajo esta aclaración, se dice que la ACU tiene una capacidad de 16 loops de control.

La ACU requiere de una interfase operador-proceso. Esto debe incluir estaciones manuales como respaldo analógico, quienes tienen una apariencia de controladores tradicionales, o pueden tener una consola local de operador (LOP), quien lleva a cabo los despliegues de operación a través de una pantalla de rayos catódicos. Estos dispositivos de interfase son ideales para montarse a una distancia de 600 pies de la zona de control.

## **HARDWARE.**

Como se muestra en las figuras 4.14 y 4.15, la ACU se compone de dos ensambles de chasis. El chasis mayor, o sea la unidad ACU básica, contiene todas las funciones electrónicas comunes a dos chasis y la mitad de las entradas y las salidas quedan descritas como hardware. Esta unidad tiene una capacidad de 24 entradas analógicas, 8 salidas analógicas, 8 entradas de contacto y 8 salidas de contacto; puede comprarse separadamente donde su capacidad satisfaga específicamente las necesidades de un proceso.

El pequeño chasis de expansión se conecta a través de un conector específico a la unidad de control distribuido básica. Este duplica las entradas-salidas hasta 48 entradas analógicas, 16 salidas analógicas, 16 entradas de contacto y 16 salidas de contacto.

Desde el punto de vista precio, no existe una diferencia entre el costo de instalación de una unidad de control distribuido básica y su expansión, de tal forma que cuando se requiera, se adquirirá el chasis de expansión y se instalará en el mismo gabinete.

La tarjeta controladora del canal de alta velocidad es una opción interconectable. Debe suministrarse con la ACU, o adicionarse posteriormente. Los cables de conexión entre la unidad de control distribuido analógica básica y el chasis de expansión quedan descritas en la figura 4.15.

Cada conector referido a las tablas terminales del cliente (CTB) tienen una capacidad de 8 entradas u 8 salidas y proporciona un espacio suficiente determinado para el alambrado de

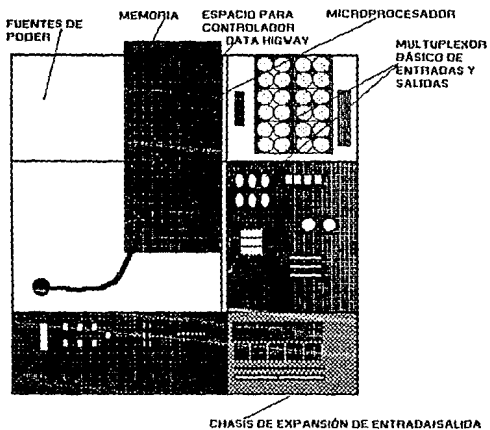
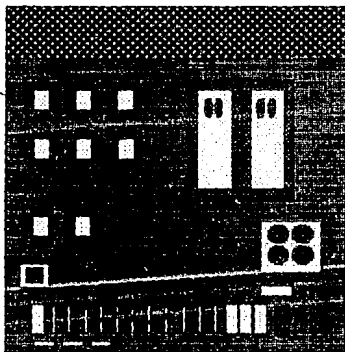


FIGURA 4.14 VISTA FRONTAL DEL CHASÍS



CONEXIÓN PARA  
LAS CTB'S



WATCHDOG  
SALIDAS Y ENTRADAS  
AUXILIARES DEL RTD  
(JUNTA FRÍA DEL  
TERMOCOPLE)

CONEXIÓN PARA  
LAS CTB'S

FIGURA 4.15 VISTA POSTERIOR DEL CHASÍS.

cualquiera de estos dispositivos. Cada CTB de corriente tiene dos conectores para cable. En el caso de tabllas de cliente empleadas para termopares se suministra como montaje integral una RTD. Las terminales son empleadas como punta fría de referencia y el RTD se emplea en la ACU para medir la temperatura de estas terminales. Las CTB's son disponibles también como puentes para puntos de resistencia.

El empleo de la consola local del operador con la unidad de control distribuido de tipo analógico es opcional. Todas las ACU's tienen la capacidad de comunicarse con una LOP; ejemplo: no hay hardware opcional requerido para incrementar esta conexión subtotal; nótese la similitud a un controlador de arquitectura dipartida; ejemplo: la ACU y la LOP pueden ir en gabinetes separados.

La ACU estándar es para el empleo de señales de alto nivel, básicamente 1 a 5 volts de corriente directa (dc) derivada de una señal de 4 a 20 mA; el usuario final puede fácilmente adaptar las entradas a otras señales de instrumentos que tienen acceso mediante la inversión de un transistor a la tablilla terminal del cliente y producir así la señal convertida de 1 a 5 volts de dc.

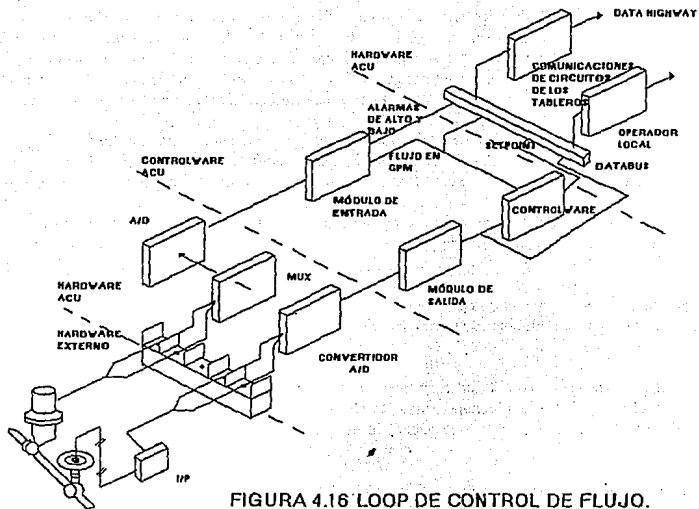
Una ACU está disponible para emplear entradas de señales de bajo nivel incluyendo termopares y puntos de resistencia. Esta opción, especificada cuando se da la orden, proporciona un convertidor A/D de alta ganancia. El nivel más bajo de entrada del ACU puede adaptarse a un nivel alto, mediante el proceso de señales e intervenirlas con señales de bajo nivel. Las tarjetas de entrada de contacto se pueden obtener con un suministro de dc de 24 volts y 125 volts de corriente alterna (ac) cuando se requiera

## CONTROLWARE.

No es necesario estar familiarizado con el lenguaje de programación para aplicar la ACU al control de procesos. Para enfatizar este punto, el software suministrado en fábrica denominado controlware y la interconexión de los módulos de software se denomina "configuración". El controlware consta de un número infinito de módulos de software como ya se mencionó anteriormente. Cada módulo es independientemente funcional hasta quedar referido por las antes mencionadas configuraciones a otros módulos para constituir así los circuitos de control. La figura 4.16 nos revela la visualización de la relación entre los módulos de software y el hardware. En él mismo se lleva a cabo la configuración de un circuito de control de flujo.

El flujo se mide por medio de una placa de orificio con un transmisor de presión diferencial. El transmisor de dos alambres queda debidamente conectado a un set de terminales en la tablilla terminal de cliente. Este set de terminales está conectado a la entrada de un multiplexor de entrada analógica. Periódicamente en estos instrumentos, la señal queda conectada al convertidor analógico digital, convertida a un número representativo en por ciento de la escala total, e introducido al módulo de software de entrada analógica

El módulo de entrada convierte la señal de por ciento en escala a un número representativo lineal del flujo -galones por minuto-. Esta señal requiere extracción de raíz cuadrada.



Adicionalmente el módulo de entrada puede verificar el flujo contra dos límites precisados de alarma cuya doble vuelta es ajustable también.

En este punto la unidad de ingeniería de flujo y el status de los set point's de las alarmas son disponibles a través del dispositivo externo denominado consola local del operador y su canal de alta velocidad denominado data highway.

Internamente, el flujo es configurado a un módulo de control. El set point es introducido dentro del módulo de control para operaciones externas de interfase operador-proceso.

La salida del controlador es configurada a un módulo analógico de la salida y tiene una relación fija con un convertidor digital analógico. El módulo de salida maneja la señal convertida digital analógica a una señal de corriente apropiada (en el rango de 4 a 20 mA) directamente en proporción a la salida de los controladores. La salida del controlador queda también disponible en el despliegue efectuado por la interfase operador-proceso.

El convertidor digital analógico se conecta a un par de terminales a la tablilla terminal del cliente, y se destina a un elemento final generalmente una válvula de control tipo neumático a través de un convertidor de corriente de aire, obteniéndose así la señal de control en el campo.

El trabajo de diseño de instalación requerido para implementar el hardware es obvio a partir de monogramas. Para complementar los circuitos, el ingeniero de proceso también lleva a cabo los siguientes pasos:

1. Selecciona un módulo analógico de entrada no utilizado a través del teclado de configuración. Esto originará un cuestionario de configuración para el módulo que se despliega en la pantalla de la consola local del operador.

2. Llenará el cuestionario con la información requerida de configuración, tal que el par de terminales de la tablilla terminal del cliente quede debidamente orientado, el tag de módulo o sea la dirección coincidirá con el diagrama de flujo de instrumentos, los límites del instrumento, el tipo de linealización y la señal de ingeniería, etc.

3. A continuación seleccionará un módulo de control no utilizado, no disponible y llenará un cuestionario de configuración en la forma similar anteriormente descrita.

4. Vinculará el módulo analógico de entrada con el de control, mediante el tag correspondiente que previamente se ha fijado en el cuestionario de configuración de aquel.

5. Seleccionará un convertidor digital analógico. Lo vinculará al tag de identificación, llenará el cuestionario de configuración.

6. Vinculará el módulo de control al módulo de salida mediante la definición de la clave controlador como fuente de señal para el módulo de salida. En esta forma la configuración de

circuito queda completa.

Para ilustrar la flexibilidad del controlware contra el hardware tradicional, consideremos que el ingeniero de proceso requiere de asociar al circuito anteriormente establecido una compensación por densidad para convertir así al flujo masa y obtener un control óptimo. La señal analógica de densidad, quedará configurada por medio de otro módulo analógico de entrada debidamente configurado, como se muestra en la figura 4.17. Los pasos involucrados son:

1. Seleccionar un módulo analógico de entrada disponible, caracterizándolo para una unidad de ingeniería de lb multiplicadas por ft<sup>3</sup>.
2. Seleccionar un módulo de cálculo disponible y caracterizarlo como multiplicador. Fijar las constantes para producir lb/min a partir del valor del flujo volumétrico por el valor de la densidad.
3. Colocar el circuito en manual.
4. Desconectar el software del módulo de flujo entrada al controlador y conectarlo al de cálculo instrumentándolo después hacia el del controlador, como se muestra en la figura 4.17.
5. Retomar el circuito a automático.

## CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA.

La ACU se interconecta con otro componente del sistema distribuido para formar un sistema funcional. Una de las configuraciones más simples se muestra en la figura 4.18; convenientemente alambrada a la terminal de la tablilla de cliente en el sistema de I/O, tanto la señal de entrada como la de salida están seleccionadas para proporcionar señales de puntos de resistencia, señales primarias con salida de 4 a 20 mA, entradas y salidas de contacto, y salidas de control analógico.

La conexión de la ACU al canal de comunicación de alta velocidad denominado data highway completa el sistema representado en la figura 4.18. Esto se lleva a cabo por medio de una tablilla impresa de conexión por inserción de la ACU. El canal de alta comunicación conecta a la ACU a una consola local central del operador o computadora en el sistema. En esta configuración el dispositivo central proporciona la interfase entre el operador y la ingeniería de la ACU.

Con la adición de una LOP, como se muestra en la figura 4.19, la ACU puede emplearse como parte de un sistema de un pequeño sistema independiente, o con la implementación de la función de alta velocidad, tanto con el sistema centralizado como con el sistema local. La LOP proporciona una interfase operador-proceso local. La ACU con el canal de alta velocidad data highway (figura 4.18) y el área de operación central, es ampliamente empleado en sistemas en donde las áreas en un proceso están relativamente lejanas entre sí. Una ACU con una consola local

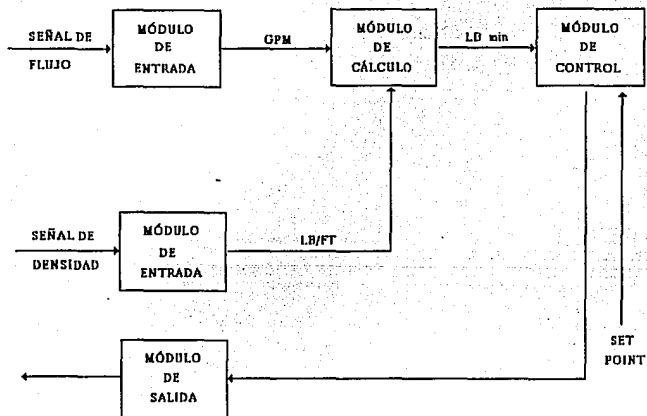
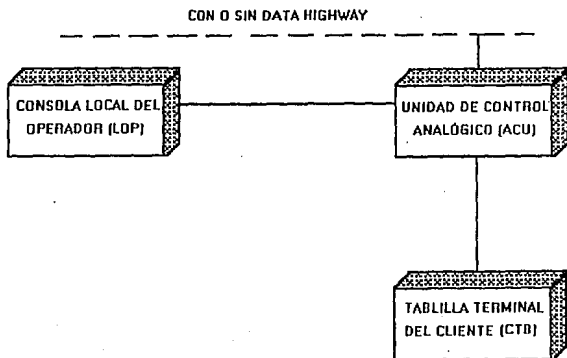


FIGURA 4.17 CONFIGURACIÓN DE LA SEÑAL ANALÓGICA DE DENSIDAD.



FIGURA 4.18 LA ACU SE INTERCONECTA CON OTRO COMPONENTE DEL SISTEMA DISTRIBUIDO PARA FORMAR UN SISTEMA MAS SIMPLE.



#### 4.19 ESTRATEGIA UNIVERSAL PARA COMPLETAR EL SEGUNDO NIVEL DE CONTROL DISTRIBUIDO.



del operador (figura 4.19) y un sistema de comunicación data highway a una consola central del operador, es la estrategia universalmente usada para tener una distribución geográfica y completar así el segundo nivel del control distribuido. La ACU con su consola del operador es aplicable para cualquier situación de control donde se requiera un control dedicado local, y es un sistema independiente o de respaldo para un área de operación centralizada.

## CONFIGURACIÓN DE LA INTERFASE OPERADOR-PROCESO.

La ACU se conecta a la interfase operador-proceso para observar el loop configurado. La consola local del operador, previamente descrita como interfase operador-proceso, se emplea aquí como un ejemplo para complementar el concepto de circuito de control en la ACU.

La figura 4.20 muestra al controlador como aparecería en el CRT en la COP (despliegue central). La barra gruesa varía en altura en proporción al comportamiento de la variable del proceso. El setpoint se indica por la pequeña marca horizontal a la derecha de la misma barra. En este caso la variable del proceso se encuentra ligeramente por debajo del setpoint, mismo que se refleja en forma digital más preciso en la parte inferior del despliegue analógico del control. La pequeña línea vertical a la derecha del setpoint, indica las alarmas de desviación.

La salida se despliega horizontalmente por medio de una barra graduada en la parte inferior del despliegue anteriormente descrito. Las direcciones de apertura y cierre de la salida están indicadas claramente. Adicionalmente una pequeña flecha indica la dirección de la cual la variable del proceso se verá afectada por incremento de la salida hacia el elemento final de control. En este caso la flecha indica que el flujo se incrementará si la salida del controlador se incrementa, es decir un controlador de acción directa.

La figura 4.21 es un acercamiento de la porción del teclado para llevar a cabo los ajustes de control. Los botones están proporcionados para transferir de automático a manual cualquier control seleccionado previamente o pasarlo de remoto a local (en el caso de circuitos en cascada). En automático, el setpoint se podrá variar mediante los botones que están arriba y abajo del botón de leyenda antes mencionado, y serán activados en dos formas de velocidad, si se presiona exclusivamente una de las teclas, el setpoint variará en la relación de 1% por segundo y si se presiona cualquiera de ambas teclas simultáneamente con la de setpoint, la variación será de 10% por segundo.

## CONFIGURACIÓN DEL CONTROLWARE.

Los datos de configuración deben de introducirse en la ACU de varias formas:

1. A través de un teletipo común conectado a la LOP por medio de un contacto total, las claves operativas aparecerán a través de la impresión del mismo.
2. Por medio de una consola de ingeniería portátil específicamente diseñada para llevar a cabo la configuración de las medidas de control distribuido, que proporciona un despliegue digital

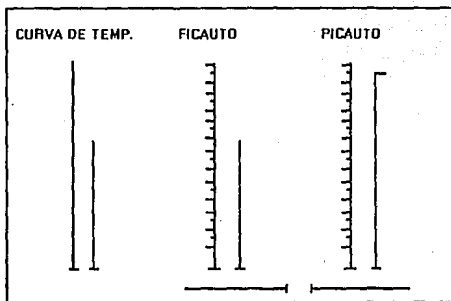


FIGURA 4.20 EL CONTROLADOR APARECE EN LA CRT EN LA CONSOLA LOCAL DEL OPERADOR

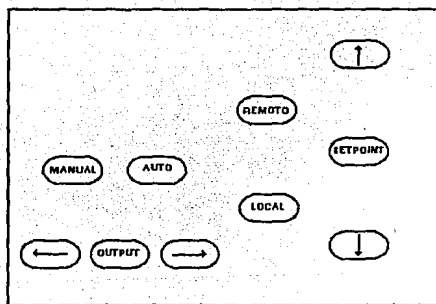


FIGURA 4.21 PARTE DEL TECLADO PARA LLEVAR A CABO  
LOS AJUSTES DE CONTROL

con el teclado alfanumérico, el cual opera como un sistema de conversación con la ingeniería de procesos. Adicionalmente se cuenta con la capacidad de registrar analógicamente dentro de la configuración y recargarse rápida y eficientemente a un dispositivo si esto se hace necesario.

3. La configuración puede efectuarse también a través de la consola central del operador a una computadora debidamente conectada a las unidades de control analógico. Debe recordarse en todo momento que la conexión a los más altos niveles debe hacerse a través del canal de alta velocidad denominado data highway. Un CRT con programación conversacional se emplea para poder realizar las configuraciones convenientes a las ACU's mediante los dispositivos centrales de alta velocidad. Cuando la configuración de circuito queda completa, se puede descargar, ejemplo: a través del canal de alta velocidad (data highway) a la ACU. Además se puede obtener una copia de los datos de configuración debidamente salvados en un sistema de disco centralizado. Como una forma de recargar para la ACU en cualquier momento.

A la configuración del controlware de una ACU puede modificársele o cambiársele totalmente en cualquier momento. Se puede implementar una nueva estrategia de control sin costos adicionales en una fracción de tiempo como la que se requiere para efectuar tal reconfiguración del sistema.

## **CONFIABILIDAD Y MANTENIMIENTO DEL CONTROLWARE.**

La ACU está fabricada bajo un programa de control de calidad comprensivo que comienza con la selección de los componentes de más alta calidad y continua con el control e inspección de todas las etapas de fabricación de los componentes hasta su ensamble final. Para incrementar la confiabilidad y disminuir el mantenimiento, la unidad central de procesos (CPU) está basada en un producto de la empresa Digital Equipment Corporation (DEC): el LSI-11 base del sistema de microcomputadora. El controlware recibe en la memoria de lectura solamente y su dato de configuración en núcleos para protección en presencia de fallas de energía.

La ACU efectúa continuamente sus diagnósticos. Mientras se encuentre en condiciones adecuadas para trabajar, se realiza esta práctica ideal en cualquier equipo crítico, además es particularmente importante el hecho de que esta unidad puede localizarse en un área remota del proceso. El convertidor analógico digital es checado entre 0 y 80% de su escala total cada 5 segundos. La apertura de termopares y otras entradas y dispositivos primarios son checados para un cambio razonable en relación instantánea. La temperatura interna del gabinete se verifica en la vecindad de la memoria de núcleos y alarmará antes de que la temperatura alcance 140° F (60° C). La microcomputadora verifica continuamente rutinas de diagnóstico a la memoria y así misma, empleando el tiempo remanente entre los intervalos de procesamiento de los módulos del software.

Todos los voltajes de suministro de energía interna quedan monitoreados y comparados contra límites desértables. La falta de energía está también monitoreada. El despliegue local proporciona una revisión local rápida de que todos los voltajes están dentro de tolerancia. El resultado de estas verificaciones es una alarma específica de indicación en la consola local del

operador, o en el cuarto central de operación, que indica en forma expedita la causa de cualquier problema. Existen ayudas visuales adicionales que complementan la protección para fallas de circuito en todo momento

En presencia de una falla de la computadora, la memoria del sistema de alarma energizará un sistema de protección denominado watchdog, todas las salidas permanecerán en el último valor, contando con las estaciones manuales se podrán realizar ajustes, si así se desea, de forma independiente al sistema, se puede proporcionar un respaldo digital total en el caso de que la estrategia de operación así lo requiera.

Si la energía principal falla, la ACU interrumpirá su operación en forma ordenada. Cuando la energía se restituya, la ACU reiniciará sus operaciones automáticamente. La duración de las fallas de energía determinarán si la ACU resume todos los controladores de proceso automático o los mantiene en la acción de operación para responsabilidad del operador. El usuario final deberá seleccionar en estas condiciones el intervalo máximo que consideré como falla, y como tiempo por falla de corriente para un rearmado automático.

Fallas existentes en el sistema de alta velocidad y en la consola local del operador no tienen efecto definido sobre la ACU con respecto al proceso. La consola puede remplazarse o repararse mientras la ACU continúe en línea manteniendo el control el proceso.

#### **TABLILLA TERMINAL DE CLIENTE (CTB).**

La tablilla terminal de clientes (CTB) es un accesorio en el sistema DCI-4000 que ofrece la conveniencia y versatilidad de conectar las unidades de control distribuido al alambrado de campo. El sistema DCI-4000 ha sido diseñado para aplicación universal del control de proceso. Los requerimientos de alambrado de entrada y salida diferirán de una aplicación a otra. Para tal propósito se ha diseñado una variedad de CTB's que satisfaga todas las necesidades de alambrado para las señales provenientes del campo a la unidad de control distribuido.

El diseño de la unidad de control distribuido (DCU) reconoce la variedad de las señales de alambrado de campo para proporcionar una flexibilidad total en sus terminales. Todas las entradas y salidas a la DCU son a través de cables especiales con conectores a 2 o más CTB's como se muestra en la figura 4.22, o bien a las terminales suministradas por el usuario. Cada conector de la DCU queda caracterizado por una cantidad específica de 8 entradas o salidas. El arreglo conector es idéntico para todas las unidades de control distribuido.

Cada conector en una DCU es idéntico a cualquiera de los siguientes:

- 8 señales de entrada analógica
- 8 señales de entrada de contacto
- 8 señales de salida analógica
- 8 señales de salida de contacto

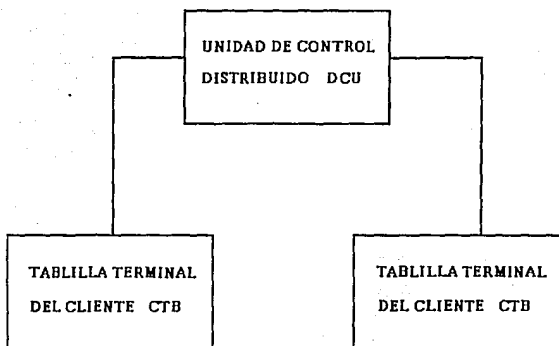


FIGURA 4.22 ENTRADAS Y SALIDAS DE LA DCU.

Cada uno de estos conectores tiene una relación específica con las tarjetas de circuito dentro de la DCU. Es decir para cada tarjeta de circuito el multiplexor corresponderá a una entrada analógica en la tablilla correspondiente. Cada conector de salida analógica está conectado a cualquiera de los 8 convertidores D/A, en el caso de la DCU básica, y cada conector de entrada de contacto queda alambrado a una tarjeta de entrada de contacto y cada conector de salida de contacto queda obviamente alambrado a la tarjeta de circuito de contacto de salida.

Todas las señales de entradas analógicas a la DCU son señales de voltajes. El acondicionamiento de señal, se requiere, si se lleva a cabo en la CTB, por ejemplo, una señal de instrumento de 4 a 20 mA convertida a 1-5 V en la tablilla terminal del cliente.

El acceso a las DCU's es a través de multiplexores de señal de alto y bajo nivel. El multiplexor de alto nivel tiene una señal operante de 0-5 V de dc. La versión de bajo nivel se emplea para tener una conversión precisa de señales de bajo nivel, particularmente termopares. Los dos tipos de tarjetas multiplexoras pueden mezclarse en una DCU.

Las señales de salida analógica pueden obtenerse en 2 versiones. Si una tarjeta convertidora de D/A se inserta en el rack de la unidad, la señal de control de salida será de 4-20 mA. Si se conecta una tarjeta de "triac" en la misma posición, la salida será a través de un sistema de 3 alambres con la señal de control correspondiente para operar motores u operadores de tipo eléctrico. El conector del sistema puede adaptarse a cualquiera de los 2 "boards".

Las tarjetas de entrada de contacto normales proporcionan una fuente de 24 V de dc para detectar la posición de un contacto seco. Se ha seleccionado el valor de 24 V de dc debido a ser uno de los más comunes utilizados en los códigos de seguridad mundialmente. Las tarjetas de entrada de contacto pueden manejar 48 y 125 V y se encuentran disponibles en cualquiera de estas 2 versiones. Dicha *fuerza de poder* se externa a la unidad de control distribuido utilizando un sistema de baterías separadas, por ejemplo.

Las salidas de cierre de contacto tienen una relación de 100 VA, 2A, 500 volts de dc, para capacidades mayores se recomienda el empleo de relevadores externos. Existen CTB's que tienen contruidos integralmente relevadores de mayores capacidades. En la CTB, cada par de conexiones en la tira terminal queda alambrado a un conector sencillo. La relación entre los conectores y las tablillas terminales queda claramente definida.

El procedimiento de alambrado, por consecuencia es como sigue:

1. Seleccionar una CTB que se adecúe a las señales por alambrear.
2. Llevar las terminales del campo y sus vendajes hasta la CTB correspondiente.
3. Conectar los cables en la CTB.
4. Conectar el cable con adaptadores para interconectar la DCU con la mencionada CTB.

El diseño del sistema DCI-4000 ofrece al usuario final una flexibilidad total en cuanto a requerimientos de alambrado e instalación, mediante la separación de las terminales de la unidad de control distribuido. Las tablillas terminales de cliente existen en una gran variedad, que manejan todo tipo de señales y requerimientos de terminación. Los cables que interconectan a la DCU y la CTB están disponibles en "stock" con una longitud de 8 pies (2.4 m). Puede haber cables hasta de 300 pies (91 m) para condiciones especiales.

Las CTB's han sido diseñadas con una capacidad relativamente pequeña de alambrado de 16 a 32 señales, y ser mezcladas a la DCU. Las variaciones en el número de terminales por señal pueden ser modificadas, proporciona a sí mismo una terminal de tablilla externa para cada par de señales. Las CTB's pueden seleccionarse para cumplir varios códigos tanto locales como internacionales. El usuario final definirá la distribución de tales terminales

Fisher & Porter Co ha elaborado formatos para documentación de las capacidades de alambrado de cada una de las tablillas y el tipo de señales que son acopladas. Es decir; cada DCU queda completamente documentada por un juego de información, el usuario final registra el nombre de las señales mediante los números de las terminales, de esta forma los documentos proporcionan un registro de la trayectoria total de las señales a cada tablilla terminal (número de terminales), a los conectores (número de patas), y de ahí al circuito del chasis de entrada-salida (número de patas).

### **CONSOLA LOCAL DEL OPERADOR (LOP).**

La consola local del operador es una interfase operador-proceso a nivel básico del sistema DCI-4000. Permite una comunicación directa con todas las versiones de las unidades de control distribuido.

La LOP se interconecta con las DCU's para formar un sistema operativo completo, o puede incorporarse como interfase operador-proceso auxiliar en sistemas distribuidos mayores con cuarto de control central. La LOP se relaciona a la DCU en forma similar a la de las estaciones de control montadas en tablero con los controladores de hardware en configuración de tipo dipartido. La LOP proporciona despliegues de las variables del proceso, setpoints, status del equipo y salidas de controladores; proporciona también botones para realizar ajustes de setpoints, ajustes de salida, transferencia de modo manual a automático y transferencia de modo local a operación en cascada. El control se lleva a cabo en la DCU. La LOP puede desconectarse de la DCU y a pesar de que el despliegue se pierda la DCU continuará operando normalmente.

La LOP tiene capacidad de conexión hasta para 4 DCU's como se muestra en la figura 4.23, existe un eslabonaje independiente de cada DCU a la LOP, este eslabonaje puede tener una distancia hasta de 183 m.

La LOP puede interconectarse con cualquiera de las combinaciones posibles con la familia de los DCU's. Más aún, las 3 versiones de la DCU pueden mezclarse con la misma LOP. La LOP consta de 2 componentes multifuncionales, un CRT de despliegue y un teclado, la figura 4.24



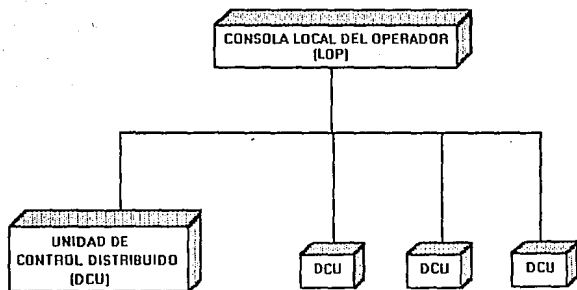


FIGURA 4.23 LA LOP TIENE CAPACIDAD DE CONEXION HASTA PARA 4 DCU'S.

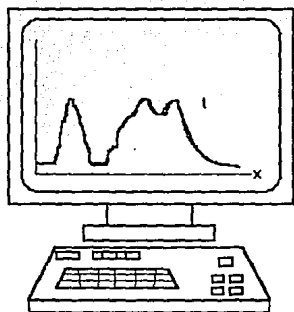


FIGURA 4.24 LA LOP CONSTA DE UN CRT Y UN TECLADO .

muestra estos componentes montados en una consola para uso, o existe también una alternativa de montaje en escritorio, la figura 4.25 muestra la LOP montada en la cara de un panel de un tablero vertical. El CRT de despliegue y el teclado se conectan a través de un cable sencillo. El chasis ha sido diseñado para proporcionar las alternativas de consola o de tablero.

Como se muestra en la figura 4.26 el eslabonaje de comunicación entre la LOP y la DCU es totalmente independiente del canal de alta velocidad denominado data highway. El data highway tiene una tendencia para aplicarse en sistemas mayores con un centro de control con jerarquía centralizada, ya que estos 2 eslabonajes son independientes de la DCU, la DCU puede implementarse con una LOP, con un canal de alta velocidad data highway, o ambos, por lo tanto, la LOP puede aplicarse como un dispositivo de interfase de operación primaria, o como interfase de operación general.

Como interfase de operación primaria, la LOP con una ó 2 DCU's es comparable menorablemente en precio de compra a cualquier tablero convencional de instrumentación. Esta comparación es aún muchas veces más menorable cuando influyen otros factores, tales como el tamaño del tablero, los costos de alambrado y los costos y dimensiones del cuarto de control.

Como una interfase operador-proceso auxiliar en sistemas distribuidos mayores, la LOP es particularmente aplicable a una planta cubriendo un área geográfica muy grande, con respecto a un cuarto de control central. La LOP toma las veces de la filosofía de despliegue como interfase operador-proceso en el sistema de DCI-4000, como una consola central del operador, o bien un sistema de computadora serie 4000. Un operador puede cambiar de un dispositivo a otro, por lo tanto, la LOP puede interconectarse en sistemas distribuidos con esta otra interfase operador-proceso para aprovechar un número de objetivos de diseño: Una estación de operador extra para emergencias y arranques, uno de respaldo, conveniencia de operación en áreas remotas de la planta, responsabilidad del operador para propósitos de distribución, etc.

La LOP ha sido diseñada por el ingeniero de instrumentación de procesos y por el operador de procesos, aunque el diseño está basado en un microprocesador, las características de capacitación requeridas para aplicar la LOP son exclusivamente para las de control e instrumentación de procesos. El operador de procesos no tendrá dificultad de transferir sus actividades a la LOP. Los despliegues del CRT y las operaciones a través del teclado han sido copiadas de las actividades convencionales realizadas en un tablero de control tradicional.

Los despliegues del CRT están dispuestos en una capacidad jerárquica de arrojamiento que permite un acceso rápido de uno al otro. El despliegue de sumario puede tener acceso en cualquier momento, mediante la presión del botón correspondiente, desplegará el panorama completo del proceso, así como las condiciones anormales en él: Alarmas, malas entradas, y alarmas fuera de servicio.

El despliegue de sumario, y el operador pueden ir directamente a cualquiera de los 16 grupos desplegados, cada despliegue "grupo" representa la información detallada de 8 circuitos de control analógico, 8 indicaciones analógicas, 8 secuencias o cualquier combinación de estos tres

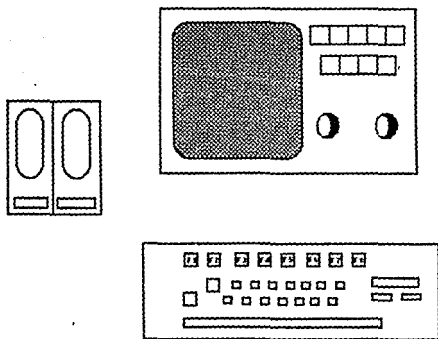


FIGURA 4.25 CONSOLA LOCAL DEL OPERADOR MONTADA EN UN PANEL DEL TABLERO VERTICAL.



**FIGURA 4.26 EL ESLABONAJE DE COMUNICACIÓN DE LA LOP Y LA DCU ES TOTALMENTE INDEPENDIENTE DEL DATA HIGHWAY.**

tipos de despliegues en un sólo grupo. Los despliegues de secuencia pueden incluir pasos, *timers*, status y programas de curvas.

De los despliegues de grupo el operador puede ir a los despliegues de punto de cualquiera de los circuitos ya desplegados con anterioridad, secuencias o indicadores. Mientras que el despliegue grupo es despliegue de operación primaria, el despliegue de punto permite el acceso en formación adicional, tales como constantes de sintonía, tendencias y setpoints de alarmas.

Un despliegue grupo consta de 8 puntos, un punto puede ser un controlador analógico, un indicador analógico, un listado de secuencia, un valor corriente de una curva programada, el status normal de un timer, el status de dos dispositivos de listado, o varios otros menos frecuentemente usados. Para propósitos de despliegue, un circuito puede desplegarse en diferentes grupos, si ellos conviene al proceso.

El despliegue adecuado de un punto sencillo queda determinado automáticamente por la LOP cuando se le asigna a partir del despliegue de grupo. El formato de despliegue está fijo por la configuración del controlware, desde el inicio de la estructuración de la unidad de control distribuido para satisfacer las necesidades del proceso. La unidad de barrido del proceso (PSU) produce un despliegue de indicación únicamente. La unidad de control analógico (ACU) produce, adicionalmente, despliegue de control. La unidad de control multifuncional (MCU), realiza tanto control secuencial, como analógico y produce todas las alternativas de despliegue.

Un despliegue completo de sumario se muestra en la figura 4.27. El despliegue es una revisión general de 16 grupos. Ocho de los grupos aparecen sobre el centro, dividiéndolos por una línea en ocho grupos en cada área, como se puede observar es este ejemplo, no todos son utilizados. El despliegue sumario proporciona la información clave respecto al proceso en sí, así como la dirección de la localización de un despliegue grupo particular.

En el primer grupo superior encontramos en la parte inferior uno de los elementos PIC 105 desplegados en video inverso y a su lado se encuentra una clave señal de alarma por bajo valor. En el quinto grupo tenemos otro nuevo video inverso que corresponde al FI 150 que posee una entrada mala en el quinto grupo inferior. En el primer grupo inferior existe un elemento con un asterisco (\*) es el TCI 110 e indica que este circuito está fuera de servicio. La característica de video inverso viene acompañada de un flasheo y de un sonido de alarma audible, y tienen lugar todos ellos en presencia de una condición anormal de proceso y no se detiene, sino hasta que se reconoce o se silencia.

Un despliegue de indicación analógica individual, consta de su tag número de clave, una escala y una vara vertical cuya altura es proporcional a la entrada del proceso. Un indicador dentro del despliegue grupo puede flashear para información adicional, ver figura 4.28.

El despliegue de controlador analógico incluye todas las características de indicador analógico y además, la indicación de set point y la salida, la figura 4.29 muestra un despliegue de controlador que ha sido sobreiluminado. El set point queda indicado por una pequeña barra

4-05-5 A TIC227 HIGH ALM.PV				MORE ALARMS				17:30
REACT1	TIC102	TIC243	FIC514	FIC305	TIC116 A	TIC116 A	TIC227	TIC220
REACT2	PI225	TI 322		FI241				FI211
	FI211	PI112		PI225				PI112
FIC103	TI235	FIC305		FI211	TI235			LI112
TIMER			TI235	ATIC227			PI225	
PRESS2				PI112				FIC305
PI225				LI112				
VPIC105			TI322				TI235	TI322
	1	2	3	4	5	6	7	8
*TIC110		WBATCH3		PI225		TI322		
		WBATCH1		PI112				
		WBATCH2		FI112		PI112		
		WBATCH3		FI150		PI225		

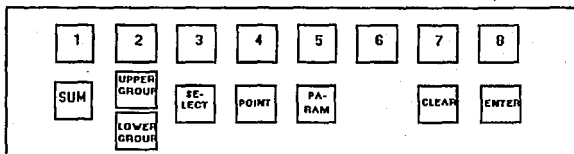


FIGURA 4.27 DESPLIEGUE COMPLETO DE SUMARIO.

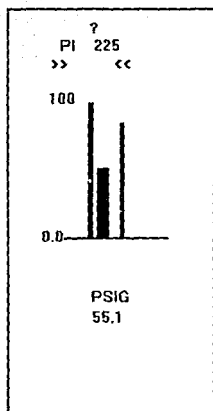


FIGURA 4.28 INDICADOR DEL DESPLIEGUE DE GRUPO

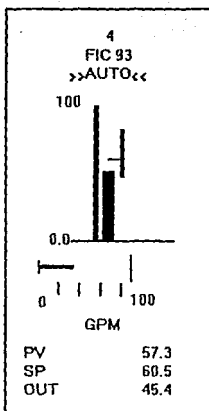


FIGURA 4.29 DESPLIEGUE DEL CONTROLADOR

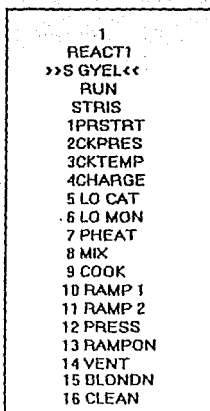


FIGURA 4.30 DESPLIEGUE DE SECUENCIA



horizontal en la parte baja del despliegue. El set point, la variante de proceso y la salida también se despliegan en valores digitales exactos. La salida siempre será desplegada en valores de por ciento de la escala total.

La figura 4.30 muestra un despliegue de secuencia. El nombre de cada fase o paso de la secuencia es asignada por el usuario. La secuencia puede arrancarse, detenerse, llevarse por etapas manualmente, o ponerse en automático por el operador y delegar así la responsabilidad a la unidad de control distribuido.

Los despliegues de punto de la variable de proceso analógica sirve para dos propósitos. Permitir la colocación de la variable de proceso en tendencia o una revisión de una tendencia que se haya establecido previamente, permite también, el ajuste de ciertos parámetros asociados, con este circuito en forma individual (constantes de sintonía, límites de alarma, etc.). Esta función finalmente descrita, se consolida por medio de un seguro de llave en el teclado de la LOP.

La LOP utiliza un teclado especializado y dedicado para funciones del operador. El teclado es del tipo sensitivo al tacto y proporciona una señal audible, toda vez que el efecto de una tecla ha tenido acción dentro del hardware del sistema. El teclado se agrupa en varias áreas funcionales. Las teclas numéricas se emplean para la entrada de datos, los despliegues de control en el CRT se localizan directamente abajo de cada una de las teclas y por número correspondiente.

## COMPOSICIÓN DEL DESPLIEGUE.

Las dos líneas superiores del CRT están reservadas para condiciones anormales, tanto del proceso, como del sistema. La primer línea despliega alarmas de puntos de proceso, la información contenida en esta línea incluye números de la DCU, el número del grupo y el número de circuito, símbolo de status, el tag del circuito, el tipo de alarma, el valor corriente y el límite de alarma. El tiempo a la derecha es la hora en tiempo real.

La primer alarma se desplegará flasheando, hasta ser reconocida, a partir de ese momento, será desplazada entonces por la siguiente alarma, en caso de existir. Si hay más alarmas es este sistema, aparecerá a la derecha de la misma línea de mensaje de alarma el mensaje de "más alarma". El propósito de esta línea es alertar al operador de las alarmas de un sistema, independientemente de la que se despliega en el área de sumario.

Las alarmas de la variable de proceso pueden ser límites absolutos fijados sobre indicadores o controladores, o pueden ser alarmas de desviación a partir del set point en el controlador. La indicación de una alarma absoluta queda ilustrada en la figura 4.28.

La segunda línea de la parte superior del área de despliegue se destina para más alarmas del equipo propiamente. Esta línea indica los malos funcionamientos, tanto de la configuración como del equipo, a través de un código numérico.

La alta cantidad de los despliegues del CRT está implementada por el ajuste de la intensidad con la que se desee mantener tal información. Esta brillantez puede manejarse a voluntad, según el estilo de trabajo de cada operador. El propósito es impedir cualquier daño por edición armónica o vibración del despliegue.

El contenido de los despliegues de grupo es totalmente flexible. La configuración de control DCU es independiente de la configuración de despliegue. Los puntos pueden desplegarse en cualquier grupo y en cualquier orden, el mismo punto puede aparecer en tantos grupos como se requiera para la conveniencia de la operación.

## CONFIGURACIÓN DE LA LOP.

La LOP es uno de los pocos dispositivos que puede emplearse para la configuración de las Unidades de Control Distribuido o DCU's. Se cuenta con un cable conector adecuado que sirve de interfase a la Consola de Ingeniería que se conecta al frente de la LOP. Mientras algunos parámetros se llevan a cabo para la configuración a través de la LOP, la mayoría de los parámetros están resguardados con un acceso restringido a través de la Consola de Ingeniería

Para cambiar los parámetros de configuración, tales como los tags, los nombres, las posiciones de despliegue, la estrategia de alambrado, etc., es necesario conectar la Consola de Ingeniería a la LOP. La Consola de Ingeniería puede ser un teletipo standard o dispositivo portátil que suministra Fischer & Porter. No es necesario interrumpir la operación de control de la DCU, mientras que se está llevando la configuración de cualquiera de los elementos y dispositivos de una DCU a través de la LOP. Este es consistente con la filosofía de la instrumentación analógica, donde un instrumento puede sacarse del servicio del tablero y modificarse, mientras los demás circuitos no tengan ningún efecto asociado. Si, por ejemplo, es necesario modificar el rango de una entrada de temperatura, deberán seguirse los siguientes procedimientos:

1. Conecte la Consola de Ingeniería a la LOP, cuando la Consola de Ingeniería se arranque, aparecerá un asterisco.
2. Indique con teclas la instrucción de "CO" (para configuración) y aplique la tecla Carriage Return.
3. La Consola de Ingeniería imprimirá el carácter TAG =
4. A continuación teclee el número de punto y presione la tecla Carriage Return.
5. La Consola de Ingeniería imprimirá entonces FUNCIÓN =
6. De acuerdo al tipo de acción, deberá configurarse de acuerdo al parámetro o puntero que se vaya a modificar, precedido por una guía roja.

7. La consola de Ingeniería imprimirá entonces con la capacidad para llevar a cabo la configuración a valor presente. Para introducir un nuevo rango del instrumento, simplemente teclee los parámetros correspondientes, y a continuación haga entrar a la información mediante la tecla de Carriage Return. (repita este procedimiento para el bajo límite y quedará configurado.

8. FUNCIÓN = es mostrada nuevamente cuando la Consola de Ingeniería ha solicitado una o más modificaciones y al terminar deberá teclearse la instrucción EX (para salir), que será la instrucción que hace abandonar al sistema el modo de configuración.

Este procedimiento se muestra en detalle en las siguientes líneas. La parte superior del rango de instrumento ha sido cambiado de 100 a 125.

```
*CO
TAG=TT 455
FUNCT=2/
2 I UR= 100.0 125.0
FUNCT=EX
*
```

El cambiar los parámetros de configuración, lo cual se puede hacer en minutos, permite una capacidad funcional total en el cambio de escalas de un instrumento, real a tal instrumento y aún reconfigurar estrategias de control.

#### DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE.

La Consola Local del Operador contiene la poderosa microcomputadora LSI-11 de la Digital Equipment Corporation, como se mostró previamente, la LOP está disponible en las versiones de montaje en escritorio en tablero. El CRT de pantalla monocromática en la LOP es de 12 pulgadas (30 cm) diagonal y tratada especialmente para eliminar reflexiones. Los despliegues de la LOP están basados en 80 caracteres por 24 líneas verticalmente.

Es posible conectar hasta cuatro Unidades de Control Distribuido a cada LOP mediante líneas de baja velocidad. La conexión es muy sencilla y es a través del cable exclusivamente al llegar a la parte posterior de la LOP. Esta Consola contiene también un interruptor para el acceso del suministro eléctrico y su fusible. El teclado sensitivo altamente confiable, se emplea para evitar las condiciones de abrasión, corrosión y accidentes, tales como derrames de líquidos dentro del área de control en proceso.

La retroalimentación audible al presionar cualquier tecla, proporciona la seguridad de que la instrucción efectuada ha tenido efecto. La LOP contiene también un conector como la interfase de la Consola de Ingeniería.

#### CAPACIDAD DE DESPLIEGUE.

La LOP ha sido diseñada para cumplir con los requerimientos diversos de un sistema

distribuido, el diseño permite: la factibilidad de despliegue a una capacidad mayor, mantener un eslabonaje para todas las Unidades de Control Distribuido. El Ingeniero de diseño refiere lo anterior como un argumento de flexibilidad.

La capacidad de despliegue de la LOP, como previamente se describió, es de 16 grupos con 8 circuitos en cada uno de ellos, ofrece pues un total de 128 puntos de despliegue. Esta capacidad de despliegue puede considerarse durante el diseño del sistema.

Por ejemplo: Una Unidad de Control Analógica (ACU) tiene una capacidad de 16 circuitos de control y un total de 48 entradas analógicas, mientras que la LOP puede comunicarse con 4 ACU's, no puede desplegar todas las entradas analógicas si la LOP se va a utilizar como dispositivo primario, su capacidad de despliegue es de 2 ACU's, considerando todas las entradas desplegadas, por otro lado, si la LOP se emplea como dispositivo auxiliar para control de acceso, y relativamente variable del proceso, su capacidad es hasta de cuatro ACU's.

### **CONFIABILIDAD Y MANTENIMIENTO DE LA LOP.**

La LOP está fabricada bajo un programa de Control de calidad factible de alto grado que se inicia desde la selección de los componentes y continúa con el control e inspección sucesiva de las etapas de manufactura de componentes a través del ensamble final, para dar más realce a la confiabilidad y mantenimiento, la Unidad Central de Proceso (CPU) está basada en un producto de prestigio reconocido como lo es la microcomputadora LSI-11 de la empresa Digital Equipment Corporation.

La LOP es un instrumento de despliegue, no realiza directamente acciones de control, (la Unidad de Control Distribuido los lleva a cabo en estas condiciones), aún desconectada, la acción de control para procesos quedará bajo la responsabilidad de la Unidad de Control Distribuido.

La LOP no contiene ningún despliegue de control para datos de configuración. La LOP adquiere estos valores a través de la Consola de Ingeniería. La LOP desplegará las alarmas del equipo que resulten de los diagnósticos de la DCU. Además, la LOP verifica diagnósticos continuos y despliegues adicionales en alarmas por el equipo.

### **CONFIGURACIÓN DEL CONTROLWARE.**

El controlware es un nombre descriptivo para los módulos funcionales construidos dentro del Sistema de Control Distribuido DCI-4000 basado en microprocesador. Los módulos de Controlware son la construcción de block básicos del DCI-4000, y están suministrados en forma de módulo de software cargados en fábrica dentro de la memoria PROM, éstos permiten a los instrumentos y a los Ingenieros de Procesos implementar sistemas de DCI-4000 sin requerimientos de programación.

La DCU se produce en tres versiones, cada una de las cuales ha sido diseñada para un área particular de control de proceso y/o monitoreo. Por esta razón aunque el Hardware es similar, el

complemento de Controlware es diferente en cada versión, como se tabula en la figura 4.31.

La Unidad de Control Analógica (ACU) se utiliza para Control de Procesos Continuos, tiene una capacidad nominal de 16 circuitos de control continuo. Los módulos de Controlware en la ACU esencialmente simulan a la instrumentación necesaria en un Tablero Tradicional de instrumentación analógica.

La Unidad de Control Multifuncional (MCU) se utiliza para aquellos procesos de tipo discontinuos, cíclicos y de dosificación, incluye: los módulos analógicos del complemento de la unidad ACU, más los módulos de Controlware adicionales y los contactos de entrada y salida para llevar a cabo, la lógica del proceso secuencial y las operaciones en el tiempo.

La Unidad de Barrido de Proceso (PSU) tiene una capacidad de entrada-salida mucho mayor que las otras dos unidades mencionadas, pero no tiene la capacidad de control lógica para llevar a cabo el control de un proceso discontinuo. Retiene mucha de la capacidad de cálculo de la ACU y MCU, de tal suerte que puede llevar a cabo una cierta cantidad de operaciones analíticas y descarga así a la computadora del sistema; puede también describirse como un multiplexor remoto inteligente. Para aplicar una DCU a un proceso particular, es necesario configurar el Controlware.

#### **FUNCIONES GENERALES DE MÓDULOS.**

El Controlware consiste de un juego de módulos, los cuales tienen una función específica y es análoga a la instrumentación convencional de tipo analógico, sin embargo, tal analogía se termina pronto, pues los módulos de Software van mucho más allá de la capacidad de la instrumentación convencional que ellos sustituyen; por ejemplo: la compensación precisa del tiempo-muerto o la simulación, pueden implementarse en una forma sumamente sencilla. Tales capacidades adicionales mejoran las posibilidades de diseño para el Ingeniero que quiere llevar a cabo un proceso avanzado a través de un sistema de microprocesadores como lo es el DCI-4000.

Una característica de los Módulos de Software es que los Ingenieros Instrumentistas aprecian muy rápidamente la transferencia de datos en Unidades de Ingeniería. La fijación de las constantes en módulos aritméticos se simplifica grandemente, considérese un caso común de adición de dos flujos. En los módulos de Software, las entradas de señal se efectúan en Unidades de Ingeniería y no en porcentaje de escala total, como sería el caso de las señales de 4-20 mA, así que éstas ya pueden ser sumadas directamente.

Los módulos de entradas y salidas caen dentro de dos tipos: los analógicos, tales como variables de proceso o setpoints; y los de señal de status, tales como alarmas, switches automático-manual, etc. Claramente las entradas de status pueden únicamente conectarse a los puertos de entrada de status, también las entradas analógicas pueden solamente conectarse a los puertos de acceso analógico.

La figura 4.32 muestra un módulo de Controlware analógico con algunas señales de entrada y salida más comunes. Las señales de entrada y las de salida se muestran con una

TIPO DE UNIDAD DE CONTROL DISTRIBUIDO (DCU)	UNIDAD DE CONTROL MULTIFUNCIONAL	U. DE CONTROL ANALÓGICO	UNIDAD DE BARRIDO DE PROCESO
APLICACIÓN	CONTROL BATCH	CONTROL CONTINUO	
NÚMERO DE MÓDULOS DE ENTRADA ANALÓGICA	48	48	36
NÚMERO DE MÓDULOS DE SALIDA ANALÓGICA	16	16	32
NÚMERO DE MÓDULOS DE CONTACTO DE ENTRADA	144	16	288
NÚMERO DE MÓDULOS DE CONTACTO DE SALIDA	128	16	256
NÚMERO DE MÓDULOS DE CÁLCULO	16	16	32
NÚMERO DE MÓDULOS DE CONTROL	16	--	--
NÚMERO DE MÓDULOS DE SECUENCIA	8	--	--
NÚMERO DE MÓDULOS DE PASO	255	--	--
NÚMERO DE MÓDULOS DE SEGURIDAD	8	--	--
NÚMERO DE MÓDULOS DE CONTADOR/TIMER	30	--	--
NÚMERO DE MÓDULOS DE MEMORIA LÓGICA	32	--	--
NÚMERO DE MÓDULOS DE PARÁMETRO	30	--	--
NÚMERO DE MÓDULOS DE STATUS DE DUPLEY	4	--	--

FIGURA 4.31 VERSIONES DE LAS UNIDADES DE CONTROL DISTRIBUIDO (DCU).

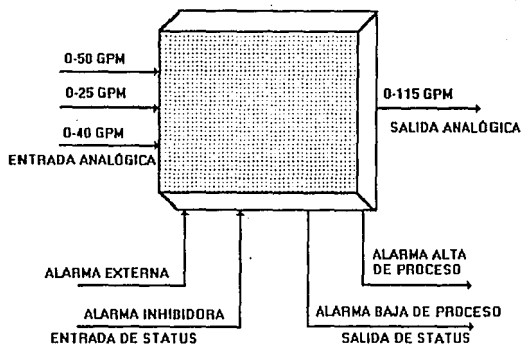


FIGURA 4.32 MÓDULO TÍPICO DE CONTROLWARE

conexión directa al block, mientras que las entradas de status y las condiciones de salida están marcadas por medio de un punto negro.

Los módulos de entrada analógica evalúan y acondicionan las señales de entrada de la instrumentación analógica, tienen una entrada y una salida, más varias conexiones de status.

Los Módulos de Cálculo y Control incluyen hasta tres entradas de señal analógica y una salida, más un número de condiciones auxiliares para status de alarma, set point, retroalimentación de arrastre set point, etcétera. Cualquier salida puede conectarse a tantas entradas como se requiera.

En el Módulo de Control, cuando se emplea un controlador standard B proporcional integral derivativo (PID), por ejemplo, la primera de las tres entradas es la variable de proceso, la segunda es el set point de tipo remoto, y la tercera es una alimentación hacia delante de tipo opcional o entrada de bias. No obstante, el módulo de cálculo cuando se emplea como multiplicador-divisor, ofrece las tres entradas en términos X, Y, y Z.

Entre los Status de señal más importantes están:

\*Alarmas de proceso cuando son ajustables de acuerdo al status de la alarma, pueden emplearse para manejar anunciadores o como entradas a una secuencia de tipo lógico.

\*Entradas de alarma de tipo externo, permiten que un módulo actúe como un anunciador para contactos de alarma externa, tales como switches de nivel.

\*Inhibir una alarma, la cual puede emplearse para prever alarmas que solo importunen durante los procedimientos de arranque o paro de emergencia, en cuyos casos las condiciones son diferentes de la operatividad de proceso.

## CONFIGURACIÓN DE LA DCU.

Configurar una DCU a una aplicación de proceso de tipo particular, involucra la designación de las funciones de los módulos de forma individual y la interconexión de ellos hasta constituir circuitos de control.

La designación de las funciones de un módulo es similar a la selección de un instrumento adecuado y su calibración para cada una de sus aplicaciones. Por ejemplo: para configurar un circuito de flujo basado en una placa de orificio y un transmisor de presión diferencial, el Módulo Analógico de entrada se selecciona, se le diseña como extractor raíz cuadrada, y se le especifica el rango de flujo, entonces un controlador se selecciona y se designa como controlador de banda proporcional más integral. Los módulos quedan entonces alambrados electrónicamente para la designación de la salida de la ya extraída raíz cuadrada de la variable de proceso que entra al controlador. El Controlador es entonces alambrado a la salida y el circuito queda completo.



## MODULO ANALÓGICO DE CONTROL.

Las mediciones de las entradas de proceso, pueden tener acceso a la DCU como señales analógicas: trenes de pulsos o formatos de tipo de código binario decimal a través de los módulos de Hardware apropiados.

La función de los módulos de entrada analógica es tomar las señales de proceso y valorar la validez de una alarma mediante la verificación, linealización y conversión de Unidades de Ingeniería para preparar el uso de otros modulos o para propósitos exclusivamente de despliegue.

Los módulos de entrada analógica no son inherentemente dedicados a las entradas específicas de Hardware, sino pueden estar asignados libremente por el Ingeniero de Proceso a cualquier señal de entrada deseada. Desde luego es necesario saber qué datos deben llenar al solicitar el "default", es decir, el descargo en la pantalla, que es el despliegue con parámetros y punteros que definen las aplicaciones específicas del módulo. Desde luego, a través de esto se está tratando de minimizar el esfuerzo requerido por la Ingeniería para implementar cualquier proceso con un sistema DCI-4000.

Todas las señales analógicas de entrada se verifican para validez y se declaran fallidas si causan que el convertidor analógico digital salga de su escala, ya sea en sentido negativo o positivo. Las entradas se declaran en sobrecarga si exceden de sus límites preestablecidos en cada instrumento. En cualquier caso, una alarma se genera y el status de la salida emite una señal haciendo, por ejemplo, que la salida de los controladores queda en el último punto del valor que tenían.

Para cada punto el Ingeniero puede especificar dos límites de proceso, éstos pueden usarse en cualquiera de las siguientes formas:

Alto/Bajo	Alto solamente	Alto/Alto
No alarma	Bajo solamente	Bajo/Bajo

Los indicadores de status que sancionan la violación de una alarma, cuando se va más allá del ajuste de esa alarma, pueden ser empleados por otros módulos así como para propósitos de despliegue, incluso en inserción fonética.

Una alarma de banda muerta es también disponible en cada punto. Esto puede ajustarse a cualquier valor entre cero y el total de la escala. Una característica específica es que las alarmas pueden inhibirse por otros módulos analógicos o por módulos de control de secuencia por medio de la entrada inhibidora de alarma.

Los módulos de entrada analógica están provistos con dos tipos de filtro, los cuales pueden emplearse a discreción del Ingeniero:

El filtro de ruido en picos y el filtro de compensación para demoras de primer orden. El

filtro de Ruido elimina la duración corta de los picos de ruido o inducciones producidas por modulación, sin efecto apreciable sobre la operación de control. El filtro de demora de primer orden proporciona un sistema filtrado ajustable que puede emplearse para disminuir la intensidad de la vibración en la señal, así como el ruido inducido de tipo dinámico por el proceso.

## LINEARIZACIÓN.

La mayor función de los módulos de entrada analógica es la linearización de la señal de entrada. Entre las funciones de linearización disponibles están:

Entrada lineal: 20% a 100% de la escala total

Entrada lineal: 0% a 100% de la escala total

Entrada lineal: -100% a +100% de la escala total

Para raíz cuadrada: 20% a 100% de escala total

Para raíz cuadrada: 0% a 100% de escala total

Termopares tipo ISA: hierro constantal, cronolalumen, rubidio, tungsteno, etc.

Detectores de resistencia por cambio de temperatura del tipo platino 100 ohms.

También se define un módulo de entrada analógica, que cuenta con los límites superior e inferior de tal instrumento y las Unidades de Ingeniería del punto. Los límites del instrumento son especificados por 1 número de cuatro dígitos más un punto decimal; 150.0 por ejemplo.

## MÓDULO DE CÁLCULO.

El módulo de cálculo proporciona un amplio rango de computación de funciones de proceso comunes en forma tal que las hace fácilmente interconectables electrónicamente. Entre las funciones de variables disponibles están las operaciones aritméticas, la compensación de flujo, selectores de señal, y generadores de función. El módulo de cálculo incorpora hasta la conexión de tres entradas de datos, una condición de salida computada y varias entradas y salidas de status. El Módulo de Cálculo proporciona la verificación de alarmas, así como la verificación del rango de salida.

## TIPOS DE CÁLCULO.

Los Módulos de Cálculo pueden configurarse para llevar a cabo cualquiera de las siguientes computaciones:

Sumar/Restar

Multiplicar/Dividir

Extraer Raíz Cuadrada

Compensar Flujo

Polinomio de Tercer Orden

Limitador de Señal

Selector del Valor Máximo

- Selector del Valor Mínimo
- Selector del Valor Medio
- Selector Externamente Controlado
- Promedio Corriente
- Promedio en Movimiento
- Generador de Función
- Generador de Programa
- Generador de Programa Síncrono
- Filtro Lead/lag
- Simulador de Tiempo Muerto
- Compensador de Tiempo Muerto
- Conversión de Unidades de Ingeniería
- Status de Proceso/Anunciador de Alarmas

Los diferentes tipos de cálculo aritmético se muestran en el Block que a continuación se expresa en la figura 4.33. Como puede verse, se proporciona número de constantes para cada módulo de cálculo. Estas constantes se emplean para proporcionar los valores de ganancia, vías o constantes de tiempo  $K_B$  y  $T$  respectivamente, según se requiera. Los valores de estas constantes son introducidos por el Ingeniero de Proceso cuando se configura el módulo.

#### TIEMPO MUERTO.

Una de las ventajas mayores para el operador del Control de Proceso, es la facilidad con la cual la función de tiempo muerto puede implementarse. El DCI-4000 ofrece tanto la simulación, como la compensación de la demora de tiempo muerto a través de las siguientes ecuaciones:

Simulación:

$$T(S) = \frac{K_0 e^{-(t\tau)}}{(1 + t\tau)}$$

Compensación:

$$T(S) = \frac{K_0(1 - e^{-(t\tau)})}{(1 + t\tau)}$$

Los tiempos muertos de un segundo a un número  $X$  de horas pueden implementarse con estas ecuaciones.

#### OBTENCIÓN DE PROMEDIOS.

Una ventaja adicional de los controles de proceso de tipo digital es la simplicidad para obtener promedios. Trabajan el promedio propio y el promedio móvil basado en 16 muestras.

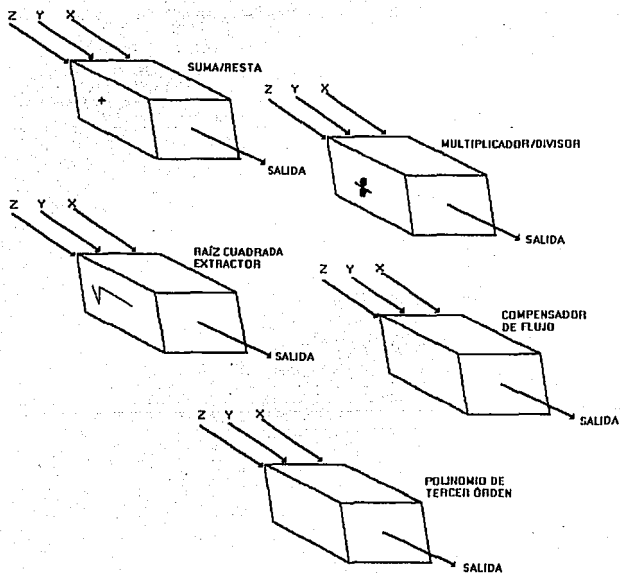


FIGURA 4.33 TIPOS DE CÁLCULO ARITMÉTICO.

La ecuación del promedio corriente es:  
 $SALIDA(n) = (i-1) SALIDA(n-1) + Xn/i$

La ecuación de los promedios móviles es:  
 $SALIDA(n) = (Xn + X(n-1) + X(n-2) + \dots + X(n-15)) / 16$

### GENERADOR DE FUNCIÓN.

La figura 4.34 ilustra el generador de función. En esta versión, es el módulo de cálculo el que genera, con una línea recta de aproximación, cualquier transferencia deseada.

Tiene disponible seis segmentos lineales, con puntos de deflexión definidos por la constante K de ganancia y B descritas al principio.

### GENERADOR DE PROGRAMAS.

Existen dos tipos de generadores de programas en el DCI-4000: El síncrono y el asíncrono. La diferencia entre los dos, es que los periodos se mantienen para el generador asíncrono definidos por la constante T, T1-T4, mientras que para el síncrono el programa del generador cambia con los valores pre-establecidos mediante un módulo de control de entrada de tipo externo (ASB) Para ambos tipos de programas, la función básica parte del valor de salida a través de una serie de pasos definidos utilizando las constantes de B, las relaciones de rampa y los pasos definidos a través de las constantes de K; y para ambos tipos de generadores, los status de las banderas de S1 y S2 se emplean para indicar el status de programa en rampa. S1 aplica durante el programa que corre y S2 aplica hasta que éste se detiene o llega al paso final (B4).

El generador de programa es particularmente útil en las aplicaciones de control de secuencia; por ejemplo, para la rampa de la temperatura de un reactor. La secuencia lógica puede, ya sea simplemente, arrancar un segmento libre (asíncrono) definido por el generador del programa, o permitir que se ponga en marcha el complemento bajo el control de sus propios timers, o también puede controlarse cada rampa y cada punto de tensión de fase empleando un generador de programa de tipo síncrono

### SELECTOR DE SEÑAL.

Se incorporan cuatro diferentes selectores de señal en el DCI-4000. De éstos, existen tres selectores de entrada que proporcionan la selección automática del valor mayor, del menor o del intermedio de las tres señales. El cuarto lleva a cabo una selección controlada externamente de una de dos entradas; en la interrupción, la salida se afecta con la pendiente de la rampa a la relación definida por el usuario de un valor al otro.

### MÓDULOS DE CONTROL.

El sistema DCI-4000 incluye un rango de controladores estándar tipo similar con la

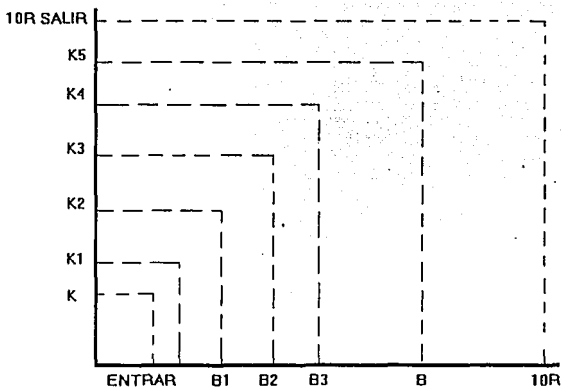


FIGURA 4.34 GENERADOR DE FUNCIÓN.

arquitectura analógica bipartida. El operador puede manipular estos controladores a través de su Consola que tiene una pantalla tubos de rayos catódicos, a través de la Consola puede ajustar el set point o la salida de su controlador, cambiar los modos entre automático y manual o local y remoto, y monitorear la variable de proceso, el set point, y la salida en la misma forma que lo hace con la instrumentación analógica.

Los circuitos de control en el DCI-4000 se sintonizan por medio de la Consola Local del Operador empleando el despliegue de punto.

## **TRANSFERENCIA SIN DISTURBIOS Y SIN PICOS.**

Los módulos de control del DCI-4000 tienen la característica de tener transferencia sin disturbio y sin necesidad de balanceo en los modos de automático a manual y viceversa, y la capacidad de abrir y cerrar cascadas en los esquemas de control analógicos clásicos, esto se hace ya sea por la acción directa del operador o por el procedimiento de arrastre del set point por el controlador maestro en la cascada; en arreglos de controladores analógicos clásicos es muy común que el set point se retroalimente al secundario en el momento en que el switch esté colocado en la posición de local, y la salida del maestro se arrastre desde el set point del secundario; los módulos intermedios, tales como los cálculos también incorporan esta característica, de tal suerte que aún los sistemas más complicados del Control incluyen transferencia sin brinco y sin necesidad de balance. La configuración real del alambrado se muestra en la figura 4.35.

Una extensión de este sistema se emplea para la conexión del DCI a una estación de respaldo analógico. En este caso, la posición de la válvula se alimenta al Módulo de Control del DCI a través de una entrada analógica, de tal forma que la salida del Módulo de Control DCI arrastre la salida de control analógico cuando el circuito está en el modo respaldo.

## **TIPOS DE CONTROLADORES.**

El DCI-4000 incorpora los siguientes tipos de controladores estándar y funciones auxiliares:

- Controlador Estándar PID (con subajustes)
- Controlador Batch
- Controlador Proporcional Flotante de Velocidad
- Controlador On/Off (gap)
- Cargador Manual
- Estación Manual de Fijación
- Selectores Override (Alto o Bajo)
- Indicador Dual
- Totalizador
- Las características estándares del controlador son:
- Alarmas de Desviación

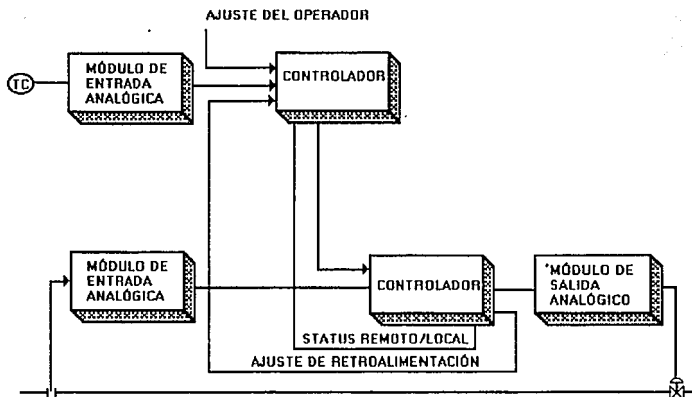


FIGURA 4.35 DCI-4000 LOOP EN CASCADA MOSTRANDO CONEXIONES DE TRANSFERENCIA DE BALANCE CON BRINCO.



Alarmas Absolutas  
Límites de Salida  
Límites de Cambio Instantáneo de Setpoint  
Límites Instantáneos de Cambio de Salida

## CONTROLADOR ESTANDAR.

El Controlador básico DCI es el Controlador Estándar de 3 modos (PID). Este controlador puede configurarse como controlador de dos modos o de modo sencillo, mediante la banda proporcional, el reset o el derivativo en forma apropiada.

Para un proporcional puro o un proporcional más derivativo, se proporciona el reset manual (ajustable de 0 a 99%).

El Derivativo puede basarse en la señal del error o en la variable del proceso.

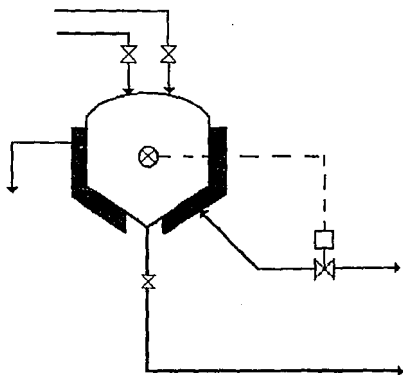
El Controlware del DCI-4000 también incluye un Controlador Estándar de tres modos con alimentación hacia adelante en entradas o entradas de vías. En la versión de alimentación hacia adelante, la entrada de alimentación hacia adelante se suma a la salida y la salida instantánea queda verificada en sus límites para llevar a cabo el resultado. La acción de reset se lleva a cabo previa adición a la entrada de alimentación hacia adelante. La entrada de bias permite para la adición de un error de bias a la señal de error normalizado antes de la computación del algoritmo PID.

## CONTROLADORES BATCH.

El Controlador Batch es un controlador de acción dual, diseñado específicamente para procesos Batch o de Lote, donde una variable de proceso tiene dos posibilidades, una, la de manejarse rápidamente a un set point deseado, y la otra la de controlarse adecuadamente en ese nuevo set point.

El Controlador Batch aprovecha este requerimiento, mediante la acción o la no acción de su controlador, cuando la variable de proceso es exteriormente definida en una zona de control alrededor del punto de ajuste y como un controlador estándar de tres modos dentro de la zona de control.

Consideremos, por ejemplo, una aplicación para un controlador de temperatura Batch, como se muestra en la figura 4.36. Inicialmente, la temperatura del reactor estará debajo y fuera de la zona de control, la salida de control para un controlador de acción inversa deberá ser del 100% y la válvula estará totalmente abierta, mientras la temperatura se va incrementando, para obtener la más veloz respuesta posible. Cuando la temperatura alcance la zona de control, el controlador cambia su actitud a la acción de un PID. Primero, sin embargo, debe llevarse a cabo alguna compensación para el tiempo muerto del proceso, esto se lleva a cabo mediante la reversión de la acción o la no reversión para un tiempo ajustable y así manejar la válvula a una posición tal, diferente de la de 100% para que sirva tal señal, como una retroalimentación



**FIGURA 4.36 APLICACIÓN DE CONTROL DE TEMPERATURA EN UN PROCESO BATCH.**

accesible y lógica al Controlador de tres modos.

## **CONTROLADOR PROPORCIONAL DE VELOCIDAD FLOTANTE.**

El Controlador Proporcional de Velocidad Flotante está diseñado para operar, por ejemplo, una válvula manejada con actuador eléctrico de corriente alterna. El principio básico del Controlador es el de mover la válvula a una velocidad proporcional a la desviación. El resultado neto de este tipo de acción de control es el mantener el movimiento de la válvula lo más rápidamente posible a la máxima desviación existente dentro de una velocidad instantánea de desplazamiento de la variable de proceso (lenta), para que se acerque al punto de control. Este tipo de controlador se emplea normalmente con un módulo de salida de triac.

La característica del Controlador Proporcional Flotante de Velocidad será:

Ajuste de Factor de Velocidad (integral)

Ajuste de Factor de Avance (Banda Proporcional)

Ajuste de zona neutra

Retroalimentación de la Posición de Válvula, para propósito de despliegue

Ajuste Óptimo del Ciclo Máximo de Acción

Ajuste para el Setpoint de Relación y el Bia

Deberá notarse que este Controlador opera básicamente como un convertidor de desviación debido al ciclo, y que el motor operado por la válvula de control, en sí, proporciona la acción integral. Obviamente, la ganancia de integral total depende no solamente de los ajustes del controlador, sino también de la velocidad y la carrera de la válvula tanto como de la acción proporcional, la cual realmente se aprovecha por la diferencia entre la acción integral inherente y la respuesta de la válvula.

Dado que el Controlador emplea efectivamente un algoritmo de velocidad, es inherente la transferencia de automático a manual sin brinco, sin disturbio y sin necesidad de balance.

## **CONTROLADOR ON/OFF (GAP).**

El Controlador On-Off se emplea para manejar una válvula de control por relevador, como se muestra en la figura 4.37. En esencia, este algoritmo de control maneja, un relevador para abrir o cerrar dentro de una desviación apropiada, en función a la zona neutra externa; cuando la desviación está dentro de la zona neutra el retraso se maneja en la posición de detenido.

## **MÓDULOS AUXILIARES DE CONTROL.**

El DCI-4000, como una línea de instrumentación analógica completa, proporciona un rango de estaciones de despliegue auxiliar, tales como estaciones de carga manual y estaciones indicadoras.

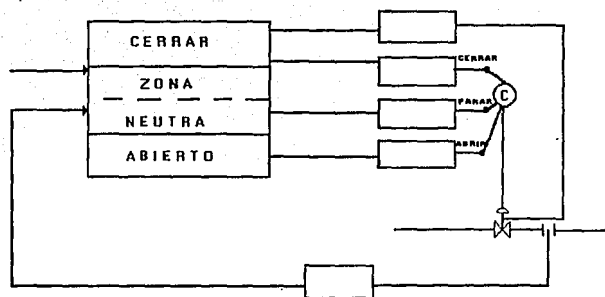


FIGURA 4.37 CONTROLADOR ON/OFF Y VÁLVULA RELEVADORA DEL OPERADOR.

## **ESTACIÓN CARGADORA MANUAL.**

La estación Cargadora Manual es similar al cargador manual analógico en la operación, mediante el cual, se puede operar directamente una posición de válvula, a través de su salida, por medio de los botones de incremento o disminución. Puede tenerse como una opción el despliegue de la variable en la misma posición en la pantalla en forma de barra.

La estación de Carga Manual puede también emplearse como una estación de transferencia auto-manual con arrastre de salida. En la modalidad de auto, la variable arrastra a la salida.

## **ESTACIÓN MANUAL DE AJUSTE.**

Esta estación auxiliar permite al operador ajustar un setpoint en forma manual para otro módulo, empleando los botones de incremento/decremento en un Sistema Analógico Tradicional. Es posible (en este arreglo) adicionar una barra de despliegue de la posición de la variable respecto a la del setpoint. Adicionalmente puede desplegarse una referencia de la entrada en la posición de la variable de proceso mediante las barras adicionales. Las aplicaciones típicas de la estación manual de setpoint son:

- Circuitos Múltiples de Alimentación de Setpoint
- Ajuste de Valores de Relación o Bias
- Ajuste Manual de Variables de Entrada
- Selectores de Override (Alto o Bajo)

Los Selectores de override se seleccionan automáticamente, ya sea para cualquiera de las dos variables, la alta o la baja o para propósitos de salida. Las dos variables se despliegan en la zona de variables de proceso y la posición de setpoint en la barra. Los selectores de Override pueden operarse en auto, set local y salida manual. En el modo de setpoint local, el selector de override se configura con una entrada de proceso y una entrada ajustable por el operador (la variable de proceso y el setpoint).

En el Modo Manual, el operador manipula directamente la salida, es decir, el selector de override puede emplearse para comparar 2 entradas de proceso, una entrada de proceso y una entrada manual, o manejar una salida ajustada manualmente.

## **INDICADOR DUAL.**

La función de esta estación auxiliar es presentar dos señales en despliegue de barras en el CRT. El formato de barra es similar al de un controlador; un punto será el representado en la posición de variable de proceso y el otro en la posición del setpoint; esto presupone que ambas entradas quedarán escaladas en el mismo rango y deberán tener las mismas unidades de Ingeniería. En este tipo de valores desplegados no es factible llevar a cabo verificación de alarmas.

## TOTALIZADOR.

Se usa para calcular una vez por segundo una variable analógica o cualquier pulso de entrada tal como flujo. Se proporciona un factor de escalamiento K que permite una libertad al usuario para seleccionar los límites de totalización, hasta una resolución de ocho dígitos. Este factor se define como:

$$K = \frac{\text{Rango de entrada en unidades por segundo}}{\text{Rango del instrumento totalizador}}$$

Adicionalmente un ajuste de salida B se proporciona para que la señal de entrada se detenga debajo del valor de B, la totalización se suspende en ese tiempo, como si se excediera una vez más el valor de B.

Pueden tenerse 2 valores predefinidos para emplearlos como un comparador interno, el cual genera una señal de status cuando el total excede a cualquiera de los valores de pre-ajuste.

Una vez llegado el total, puede restablecerse al valor de cierre empleando el botón de RESET en la Consola Local del Operador o bajo el control de secuencia.

## MÓDULOS ANALÓGICO DE SALIDA.

El Módulo Analógico de Salida efectúa la interfase de otros módulos de Controlware al Hardware de salida, tales como Convertidores de 4 a 20 mA, y convertidores digitales a triac.

## MÓDULO DE CONTACTO DE ENTRADA.

El Módulo de Contacto de Entrada acepta señales (de entrada) de contacto de circuitos de entrada aislados y los condiciona para el uso de los Módulos de Controlware. Este acondicionamiento puede invertir la señal del status de los contactos si se requiere para llevar su función designada correctamente.

Las señales de Entrada de Contacto pueden emplearse para diferente número de funciones, como:

Entrada de Secuencia, Entrada de Switches de Nivel, Impresión para Alarma, etc., así como para el Control Externo de otros módulos, tales como selectores de señal.

## MÓDULOS DE CONTACTO DE SALIDA.

El módulo de Contacto de Salida lleva a cabo la interfase de los contactos de salida al Hardware de salida. Se pueden obtener cuatro funciones de ella.

Salida en clavada

Cierre de contacto momentáneo por 2 segundos

Cierre de contacto momentáneo por 5 segundos

Cierre de contacto momentáneo por 10 segundos

Se proporciona, asimismo una bandera de fuera de servicio tal que para propósitos de debug o análisis de las logísticas pueda tenerse una salida que se declare al proceso fuera de servicio y pueda mantener la salida abierta.

## CONTROL DE PROCESO BATCH.

El Controlware del DCI-4000 proporciona al ingeniero una herramienta poderosa para implementar estrategias de control Batch, así como Control Continuo. El Control Batch es implemento mediante el uso de una Unidad de Control Multifuncional (MCU). Este incorpora tanto los Módulos de Control Continuos como los de secuencia, de tal suerte que las secuencias puedan responder a las señales analógicas manipuladas.

Los requerimientos para el control de secuencias son:

1. La ejecución de instrucciones de salida basadas en prueba de entrada en una modalidad secuencial.
2. Una interfase completa al operador.
3. El monitoreo continuo del status del proceso.

Estos requerimientos son coordinados por los siguientes módulos:

1. El módulo de Pasos lleva a cabo las pruebas de entrada y ejecuta las acciones de salida.
2. El Módulo de Secuencia proporciona una interfase al operador para una agrupación de una serie de Módulos de Pasos en cada una de las fases de tal secuencia, todas estas fases llevan a cabo una secuencia específica.
3. El Módulo de Seguridad verifica que los status del equipo en proceso sean los correctos durante los pasos de la secuencia y en el transcurso de cada una de ellas.

La relación de los tres módulos está ilustrada en la figura 4.38. Los Módulos de Secuencia se despliegan en la Consola Local del Operador y proporcionan a la interfase operador la secuencia, incluyendo el acceso a los Módulos de Pasos, así como a los status del Módulo de Seguridad. Las instrucciones del operador, tales como arrancar, esperar, o restablecer, son entradas a través de la Consola Local del operador a cada uno de los Módulos de Secuencia. El Módulo de Secuencia pasa las instrucciones al Módulo de pasos adecuado. La secuencia se lleva a cabo mediante una serie de Módulos de Pasos que llevan a cabo opciones de salida basados en pruebas de entrada. Considerando que no ocurriese una falla la secuencia se lleva a cabo. El control es regresado al Módulo de Secuencia.

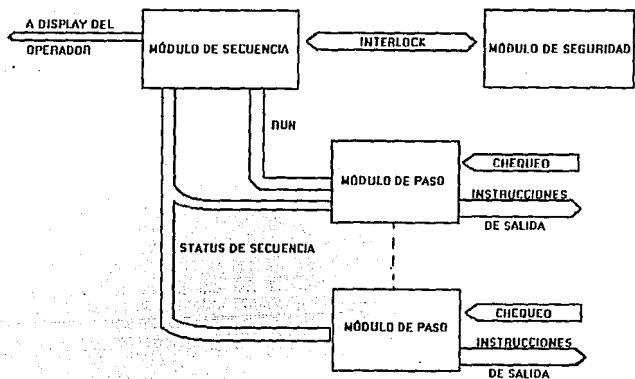


FIGURA 4.38 RELACIÓN DEL MÓDULO DE PASO, DEL MÓDULO DE SECUENCIA Y DEL MÓDULO DE SEGURIDAD.



El Módulo de Seguridad monitorea el equipo a controlar mediante los Módulos de Pasos. El Módulo de Seguridad prevendrá una instrucción de arranque a los Módulos de Pasos si las condiciones iniciales de estado del proceso y su equipo han sido prescritas por el ingeniero.

## MÓDULO DE PASOS.

El Módulo de Pasos es el elemento secuencial del Controlware. El Módulo de Pasos puede hacer un máximo de 6 pruebas o, en condiciones de entrada, producir un máximo de 6 salidas o una combinación arbitraria de los dos anteriores. Refiérase a la figura 4.39.

El Módulo de Pasos lleva a cabo pruebas bajo la lógica AND-OR. Si estas pruebas son reales, el Módulos de Pasos efectuará las instrucciones de salida y procederá al siguiente paso. Si las pruebas son falsas, el Módulo de Pasos procederá a un paso adicional. El paso adicional puede reciclar al mismo módulo de Pasos, esperando que la secuencia sea la adecuada para que la condición, sea verdadera. Un Módulo de Pasos puede probar 3 condiciones, cerrar 3 válvulas si las pruebas se cumplen y pasar la secuencia al siguiente Módulo. El Módulo de Pasos puede producir hasta 6 salidas sin el requerimiento de pruebas o cualquier condición y después pasar la secuencia al siguiente paso. La característica de capacitación del Módulo es un máximo de 6. Puede haber un máximo de 6 condiciones para probar un máximo de 6 salidas o una combinación de ambas sin exceder de 6.

Las instrucciones de pruebas básicas por pares, las cuales pueden entrarse al Módulo de Pasos son:

IFON	IFOFF
IFOPEN	IFCLOS
IFSTRT	IFSTOP
IFONE	IFZERO

Todas las instrucciones en la primera columna son prueba para un estado y todas las instrucciones de la segunda columna son verificaciones para el estado ZERO.

La con-entrada en la configuración es, por consiguiente, de la forma:

IFON 001004

Este establecimiento verifica el status del Módulo de Contacto de Entrada número 4 par el estado UNO. El estado UNO, en este caso, puede representarse por una válvula. Si el contacto de entrada ha sido asignado por un Tag, la entrada puede referirse al Tag:

IFOPEN VLV005

Todos los Módulos de Contacto de Entrada pueden ser asignados con un Tag.



Para interconexión con los Módulos Analógicos, una configuración que sea introducida, puede también llevar la forma:

IFON LI100.PA2

Esta instrucción prueba a la alarma de proceso número 2 del Módulo Analógico de Entrada definido como LI100. Esto podría ser un Módulo de Entrada Analógico en donde PA2 está siendo empleado para indicar que el nivel de tag es ZERO.

Las instrucciones de salida básicas en pares son:

ON	OFF
OPEN	CLOSE
START	STOP
ONE	ZERO

Una instrucción típica de salida es de la forma:

CLOSE V110.XIB

Esta es una instrucción para cerrar el contacto de salida el cual está asociado con el Módulo de Contacto de Salida y con el Tag V110. El bit de entrada para la acción de contacto se identifica como XIB.

Las instrucciones de salida pueden también llevar la dirección de otros módulos. Una instrucción típica es:

START TMR004.SSB

Esta es una instrucción para arrancar el Módulo de Timer número 4. El bit de entrada SSB controla el arranque y el paro del timer.

Más allá de las instrucciones básicas del Módulo de Pasos, se tiene un repertorio de instrucciones sofisticadas para direccionalizar la mayoría de cualesquiera situación que se pueda encontrar en un proceso Batch. Por ejemplo, sintonizando un controlador que pudiera alterarse basándose en condiciones del proceso.

Otras funciones que pudiesen seleccionarse en el Módulo de Pasos durante la configuración son:

1.Wait - La secuencia puede colocarse en el estado de espera (wait) automáticamente mediante este paso.

2.Operator Call - El operador puede ser alertado basado en la prueba efectuada, ya fuera

cierta o falsa.

3. Wait Enable - El ingeniero puede permitir que al presionar el botón de Wait en la Consola del Operador, la secuencia se vuelva activa durante ese paso.

La figura 4.40 muestra una interconexión típica del Módulo de Pasos en una secuencia. Las pruebas se llevan a cabo una vez por segundo. El Módulo de Pasos referido a sí mismo pudiera no demorar otro Controlware, como si el status la verificara brevemente una sola vez por segundo. El tiempo máximo disponible para que un Módulo de Pasos pueda reciclar en sí mismo, se determina por la configuración, usualmente en el Módulo de Seguridad.

Se ilustra en la figura 4.40 varios puntos:

1. Un Módulo de Pasos (número 1) sin entradas, que verificarán con aciertos siempre, llevarán a cabo acciones de salida.

2. Módulo de Pasos (número 2 y 4) con una entrada, ya sea desde designación lógica AND/OR.

3. Módulo de Pasos (número 3 y 5) que puede reciclar a través de la posición ELSE STEP o paso adicional, esperando que la prueba sea verdadera.

4. Un paso Adicional (ELSE STEP) que pueda brincar a una lógica alternada (número 2 a número 4).

5. Cualquier número de ELSE STEP o Pasos Adicionales o Pasos Sigüientes (Next Steps) pueden referirse al mismo Módulo de Pasos (número 4 y 5 a número 2).

## MÓDULO DE SECUENCIAS.

El Módulo de Secuencias se emplea para ordenar los pasos en una secuencia dentro de las fases relacionadas del proceso, hasta un total de 16 fases. Los Módulos de Secuencia puede conectarse en serie si lo requieren las fases adicionales, cada fase consiste de uno o más Módulos de Pasos. Las fases se despliegan para una información del operador y su acción. Durante la configuración se puede entrar la siguiente información dentro del Módulo de Secuencia:

1. El nombre o Tag de la secuencia
2. El nombre de cada fase
3. Por cada fase, el número de Módulos de Pasos que se están iniciando por fase
4. Una bandera para aquellas fases donde el operador se le permita arrancar el proceso
5. El primer paso de la lógica de restablecimiento
6. El primer paso de la lógica de seguridad
7. La acción que se toma después de una falla de corriente
8. Identificación de los Módulos de seguridad empleados en la secuencia

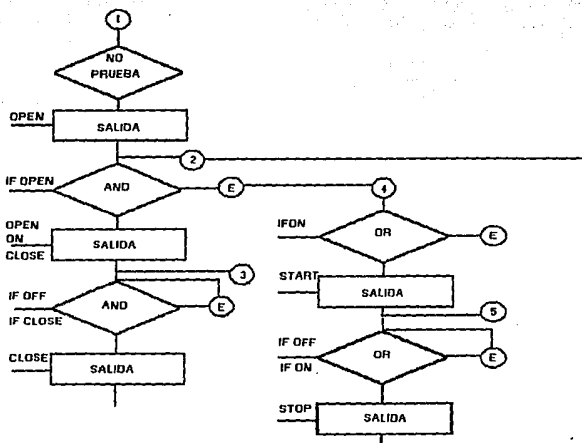


FIGURA 4.40 INTERCONEXIÓN TÍPICA DEL MÓDULO DE PASOS.

## 9. Identificación de los Módulos de Parámetros empleados en la secuencia

La información de identificación que ha sido entrada, se emplea para el despliegue en la Consola local del operador. El arranque de la parte superior del número del tag del Módulo o nombre del Módulo, queda desplegada. A continuación habrá una indicación del status de la secuencia, si es de ciclo sencillo, si es continua o de fase sencilla. El status de la secuencia queda indicado en la posición de RUN, WAIT o condición inactivo, y el paso corriente se despliega a continuación. Debajo cada una de las fases están enlistadas por número y nombre, la fase corriente es identificada por una flecha.

La lógica de reestablecimiento y la lógica de seguridad quedan configuradas por los Módulos de Paso. Si la lógica de reestablecimiento se ha configurado en el módulo de paso inicial, también habrá quedado identificada en el módulo de secuencia, así esta secuencia se lleva a cabo si el operador selecciona la secuencia y presiona el botón de RESET en la Consola Local del Operador.

Si la secuencia de un módulo de seguridad lógica se ha configurado en el número de primer módulo de paso y entrado en el módulo de secuencia, entonces esta secuencia automáticamente se activará si existe una violación de seguridad mediante el módulo de seguridad.

La interrupción de la energía en la MCU resulta en un paro ordenado. Cuando la energía se restablece, la MCU resumirá la operación. La configuración se entra al módulo de secuencia y determina la acción apropiada a seguir al tener la recuperación de la energía. Estas acciones son:

1. Continuar
2. Ve a WAIT
3. Ve hacia Inactivo
4. Ejecute la Lógica de Reset
5. Ejecute la Lógica de Seguridad

Posteriormente, estas acciones pueden basarse en la longitud del tiempo de la falla de poder y medirse mediante un Hardware externo.

### **MÓDULO DE SEGURIDAD.**

Un requerimiento general en las aplicaciones de la secuencia es monitorear continuamente el status de todo el equipo, tal como el de válvulas y actuadores bajo el control de secuencia. Esto se lleva a cabo mediante la verificación de los contactos de retroalimentación del equipo que corresponden a los status esperados, basados en el estado corriente de las salidas de contacto controlando el equipo.

El Módulo de Seguridad proporciona los medios convenientes para detectar las condiciones anormales. La configuración de los Módulos de Pasos es significativamente simple,

mediante el aprovechamiento de éstas verificaciones en un módulo separado, pueden configurarse hasta cuatro Módulos de Seguridad con un Módulo de Secuencia. Cada Módulo de Seguridad puede monitorear hasta 16 entradas y salidas y sus interrelaciones:

Se verifican tres condiciones:

1. La posición correcta de todos los dispositivos antes de que la fase sea iniciada por el operador
2. Las condiciones deseadas contra la condición real de los dispositivos monitoreados (verificaciones continuas)
3. El límite de tiempo para que los dispositivos cambien de estado después del comando de salida.

Las condiciones monitoreadas por este módulo de seguridad pueden observarse en la Consola Local del Operador. Las verificaciones de seguridad se llevan a cabo a través del teclado del operador, permitiendo a la secuencia ser iniciada; estas funciones están aseguradas por la llave.

La configuración es una tabla sencilla de entrada de 16 líneas. Una línea se ilustra en la figura 4.41. Las primeras dos entradas indican que la salida identificada como módulo de contacto de salida número 3, está relacionada al status del contacto de entrada número cuatro, la tercera y la cuarta entradas indican que cuando la salida es cero, el contacto de entrada deberá estar en condición 1, y cuando el contacto de salida presente una condición contraria, la entrada deberá ser 0. La quinta columna es el tiempo permitido para que CCI004 cambie su estado, cuando el CCI003 cambie su estado a su vez. En otras palabras, la verificación del status de la columna 3 y 4 se suspende 15 segundos después del cambio del estado del módulo CCI003.

Las siguientes 16 columnas definen el estado de CCI004 al inicio de cada fase. El módulo de seguridad no permitirá al operador iniciar cualquiera de las fases a menos que en la tabla no se indique tal condición en el status. Cuando el status sea aceptable por parte de un dispositivo deberá entonces entrar a la función un 0 o un 1.

## **MÓDULOS ESPECIALES PARA APLICACIONES BATCH.**

En suma, en los módulos anteriormente descritos, existe un número de módulos en la MCU específicamente implementados para aplicaciones batch. Éstos se describen a continuación.

### **MÓDULO DE MEMORIA LÓGICA.**

El Módulo de Memoria/Lógica, se emplea para llevar a cabo funciones lógicas como: Y, O, o exclusiva, No, o hasta una función de tres entradas; y proporcionar en un tiempo corto, o en memoria permanente, el status deseado de entrada para pulso. Las funciones de memoria son de hecho, muy similares a las funciones de un módulo de contacto de salida, en la cual se pueden incluir una salida enclavada y una selección de dos segundos, cinco segundos, diez segundos, todos ellos mediante pulsos.

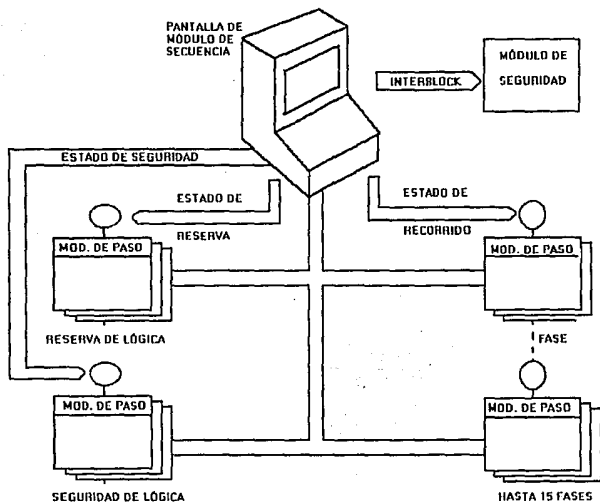


FIGURA 4.41 LÍNEA DE LA CONFIGURACIÓN DE UNA TABLA SENCILLA.



## MÓDULO DE PARÁMETROS.

El Módulo de Parámetro retiene 8 valores preestablecidos que pueden transferirse mediante una lógica de secuencia a otros módulos. Es esencialmente un archivo fijo de longitud de ocho valores analógicos, puede desplegarse en la Consola Local del Operador, y a través del empleo del despliegue de punto el operador puede cambiar esos valores de datos con empleo del mismo teclado funcional. Los Módulos de Parámetros pueden encadenarse juntos para formar expedientes mayores. En los Módulos de Parámetros se pueden almacenar los siguientes datos:

1. Valores de salida para entradas analógicas, cálculo o módulos de control.
2. Límites de proceso (alarmas) para entradas analógicas, cálculos o módulos de control.
3. Valores preestablecidos para timer/controladores.
4. Valores de set point a seguir por controladores.
5. Valores de banda proporcional para controladores.
6. Tiempo de restablecimiento para controladores, tiempo de reset para controladores.
7. Tiempo de derivativa para controladores.
8. Zona de control para controladores.
9. Desviación para controladores.
10. Relación para controladores.
11. Constantes de vías para Módulos de Cálculo.
12. Valores de preajuste para totalizadores.

El Módulo de Parámetros se utiliza para memorizar o para cambiar los parámetros en otros módulos. Las entradas y las transmisiones de los datos se llevan a cabo mediante dos tipos de instrucciones asociadas con un Módulo de Pasos. Un tipo de instrucciones transfiere los datos de un Módulo Analógico a una localización específica en el Módulo de Parámetro. El otro tipo de instrucción transfiere los datos de una localización específica del Módulo de Parámetros hacia el Módulo Analógico, es decir, el Módulo de Parámetros puede recordar un set point de uso anterior, o cambiar el valor de banda proporcional en un controlador basado en la desviación de su set point. El Módulo de Pasos también tiene la característica de comparar instrucciones aritméticas para el uso del Módulo de Parámetros.

## MÓDULO DE DESPLIEGUE DEL STATUS.

El módulo de despliegue del status es un módulo auxiliar para desplegar entradas y salidas de contactos en pantalla. Permite el establecimiento de un despliegue de un punto sencillo o de una combinación de pares de contactos I/O. El equipo puede arrancarse o detenerse manualmente a través del teclado funcional del operador. Las condiciones de alarma pueden especificarse para estados de contactos de entrada si así se desea. Todos los contactos de salida que son parte de la secuencia de operación pueden ser implementados y cambiarse usando un módulo de secuencia de despliegue en la LOP, de tal forma que el módulo de despliegue de status lleve a cabo las funciones del equipo operado manualmente por el operador a través de la consola. Existirán casos donde sea conveniente operar el equipo manualmente a través del display del status.

## CAPÍTULO V. APLICACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO AL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ACETONA.

La actividad de selección de la alternativa de procesamiento o proceso a realizar dentro de la Ingeniería de Proyectos, involucra el análisis de muchos factores tales como los costos del equipamiento, de servicios auxiliares, de mantenimiento, disposición de la materia prima, análisis económicos de rentabilidad, valor presente neto y tasa interna de retorno y muchos otros. Para el presente caso de estudio, dicha actividad no fué tomada en cuenta, dado que casi cualquier alternativa de procesamiento o proceso elegido puede servir para ilustrar la aplicación de un Sistema de Control Distribuido. Las actividades tales como el desarrollo del diagrama de flujo de proceso (DFP) y el diagrama de tubería e instrumentación (DTI), serán adaptadas junto con las filosofías de control y operación y servirán de base para realizar el objetivo principal de este caso de estudio.

La adaptación de un DCS a un proceso industrial, una vez instrumentado, consiste en el establecimiento de los equipos principales que serán utilizados para su control automatizado junto con sus especificaciones, la selección de equipo periférico, del sistema de comunicación y su redundancia, del sistema de seguridad, de los displays en proceso y a nivel gerencial, la especificación del equipo en los cuartos de control y en el cuarto de ingeniería, así como la instrumentación e interfases adecuadas para el tipo de filosofía de control aplicada en cada sección del proceso.

### 5.1 PRODUCCIÓN DE ACETONA.

La acetona es un excelente solvente para un amplio rango de gomas, ceras, resinas, grasas, aceites y celulosas. Es usada en la industria del acetileno, en la manufactura de revestimientos y plásticos y como materia prima para la síntesis química de una gran variedad de productos tales como metilmetacrilato, bisfenol A, metil isobutil cetona, diacetona, hexilenglicol e isoporone. Otra de sus características es ser fácilmente biodegradable.

La producción mundial de acetona en 1990 fue aproximadamente de 3 millones de toneladas métricas por año, una tercera parte fue producida por los Estados Unidos. El 60% de acetona es obtenida como coproducto en el proceso de fenol vía oxidación de cumeno, y la restante se obtiene como residuo de la dehidrogenación de alcohol isopropílico. El primer método de obtención es usado por 21 ó 31 compañías de Norte América, Europa y Japón, véase figura 5.1.

Estudios cualitativos han demostrado que el proceso de acetona a partir de cumeno, tiene algunas ventajas con respecto a otros procesos<sup>1</sup>, ya que el catalizador utilizado es más fácil de conseguir y es muy barato aún cuando necesita ser tratado antes de utilizarse; también se considera que la pureza obtenida del producto es mayor que en los otros dos procesos. Sus condiciones de operación son moderadas y la materia prima es producida por PEMEX.

---

<sup>1</sup>Acetona a partir de alcohol isopropílico y a partir de benceno y propileno.

	CANADÁ	MÉXICO	EUROPA	JAPÓN
COMPAÑÍAS PRODUCTORAS	2	2	14	16
CAPACIDAD 10 <sup>3</sup> T	44	94	988	324
PRODUCCIÓN 10 <sup>3</sup> T	41	47	867	260
IMPORTACIÓN 10 <sup>3</sup> T		0.6		8
EXPORTACIÓN 10 <sup>3</sup> T	18	1.4		31

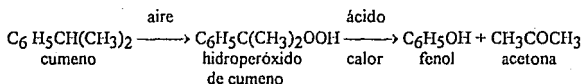
\*ESTADOS UNIDOS PRODUCE ANUALMENTE 1046 10<sup>3</sup>T

FIGURA 5.1 PRODUCCIÓN DE ACETONA EN EL MUNDO, 1991.

Sin embargo su producción tiene la desventaja siguiente: La capacidad instalada de producción de cumeno que existe en el país, no contempla el desarrollo de procesos de tal envergadura y por ende es difícil su realización. Tal vez el mayor inconveniente que tiene este proceso en México dadas las condiciones en el mercado de fenol, es el de obtener como producto principal a éste último, (por ejemplo: si por cada 8.45 g de acetona se producen 14.098 g de fenol; y el objetivo fuera obtener 80,000 ton/año de acetona, se producirían 133,500 ton/año de fenol, muy probablemente difíciles de comerciar dentro del país).

## DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ACETONA.

El cumeno se somete a un proceso de oxidación continuo a una temperatura de 80-130°C y una presión de 80 psig, convirtiendo cerca del 20% del cumeno en hidroperóxido de cumeno, el cumeno que no reacciona es recuperado, lavado y recirculado. El hidroperóxido de cumeno es concentrado hasta 85% en un evaporador, y separado en fenol y acetona bajo condiciones ácidas. La reacción de oxidación es exotérmica y debe ser cuidadosamente controlada debido a su sensibilidad. Esta operación se lleva a cabo en una serie de 4 reactores, en los cuales se deposita una capa de 2 a 3% de NaOH como estabilizador. La alimentación al primer reactor es cumeno fresco y cumeno reciclado proveniente de un concentrador u otros reactores, se burbujea aire atmosférico o aire enriquecido con oxígeno por la parte baja del mismo y escapa por la parte superior, posteriormente el producto se conduce hacia los siguientes reactores. La reacción llevada a cabo es:



Las temperaturas declinan de 115°C en el primer reactor hasta 90°C en el último, la cantidad de oxígeno consumido es más grande en los reactores finales; de esta forma la velocidad de reacción se mantiene en un nivel muy alto mientras se minimiza la descomposición promovida por la alta temperatura del hidroperóxido.

Con este procedimiento la concentración del hidroperóxido de cumeno es de 9 a 12% en el primer reactor, de 15 a 20% en el segundo, de 24 a 29% en el tercero y de 32 a 39% en el cuarto. El rendimiento de hidroperóxido está en un rango de 90 y 95%. El tiempo total de residencia en cada reactor es de 3 a 6 horas.

El producto obtenido de la reacción anterior es concentrado por evaporación hasta 75 y 85% de hidroperóxido de cumeno. Se hace reaccionar al hidroperóxido bajo condiciones ácidas con agitación (se usan ácidos inorgánicos no oxidables como el ácido sulfúrico<sup>2</sup>), el recipiente debe mantenerse a una temperatura de 60 a 100°C.

<sup>2</sup>empleado como catalizador.

Después de la reacción anterior se obtiene una mezcla de fenol, acetona y una variedad de otros productos como cumilfenoles, acetofenona, dimetilfenilcarbinol, alfametilestireno e hidroxiacetona; éstos son neutralizados con una solución de fenóxido de sodio, otras bases adecuadas o resinas de intercambio iónico. También se lleva a cabo un lavado con agua para facilitar la remoción de sales inorgánicas. El producto puede ir a una separación y un tanque de lavado o ir directamente a una torre de destilación.

El producto recuperado por destilación es la acetona cruda. Se pueden usar dos o más columnas de destilación para obtener la pureza deseada. Si se usan dos columnas, la primera removerá impurezas como acetaldehído y propionaldehído y la segunda torre eliminará pesados no deseados y la mayor cantidad de agua.

El rendimiento de acetona a partir del proceso cumeno/fenol es de 94%. Los subproductos son significantes cantidades de alfametilestireno, acetofenona, así como pequeñas cantidades de hidroxiacetona y óxido mesitil. Las cantidades de subproductos varían de acuerdo al productor. El alfametilestireno puede ser hidrogenado a cumeno para reciclarse. El rendimiento de acetona declina en un 5% cuando no se recicla dicho compuesto.

El fenol obtenido de la destilación puede ser tratado posteriormente para obtener fenol de mayor pureza, sometándolo a un proceso catalítico. El fenol crudo es suficientemente puro para ser utilizado en la producción de resinas y otros derivados.

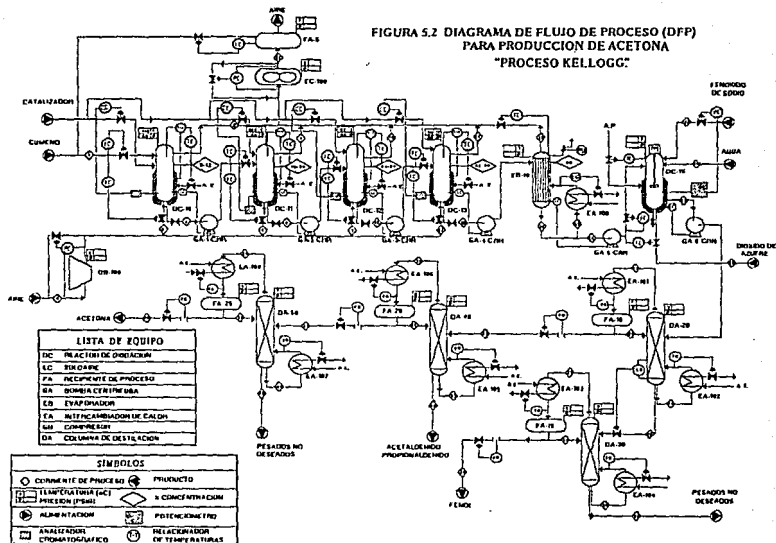
## 5.2 DOCUMENTOS BÁSICOS DE INSTRUMENTACIÓN.

### *El Diagrama de Flujo de Proceso (DFP).*

Es un diagrama que representa en forma general un proceso; en este caso el proceso de acetona, (figura 5.2), en el cual se especifican las siguientes características:

1. Los equipos principales (símbolos y claves de identificación).
2. Las condiciones de operación en los equipos.
3. La lista de equipo (clave y servicio).
4. Las corrientes principales de proceso y la señalización del sentido de flujo.
5. Las alimentaciones y salidas de los productos.
6. Los controles básicos de proceso (elemento primario de medición y elemento final de control).

Estas no son todas las características de un DFP, pues existen algunas otras como el balance de masa y energía, que para este caso de estudio no era indispensable tomarse en consideración.



### *Los esquemas de instrumentación para el control de los equipos principales.*

Estos esquemas son la base del Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI), éste último muestra todos los equipos del DFP, algunos accesorios como venteos, drenes, válvulas de control y seguridad, se identifican las líneas de proceso, y los loops de control que son de gran importancia para satisfacer la operación normal, de mantenimiento, arranque, paro y emergencia.

Los siguientes esquemas se presentan en el orden en el que aparecen en el DFP y se identifican de acuerdo a su clave (figura 5.3 a la 5.8).

#### *Formas de control de los equipos.*

**REACTORES DE OXIDACIÓN.** Esta serie de reactores fue controlada de la misma forma; se controló el flujo de alimentación de reactivo, la concentración de catalizador en cada reactor, el flujo de refrigerante en la chaqueta utilizando un loop de control en cascada, el flujo de aire que proviene del compresor, el nivel del líquido en los reactores mediante un sistema de bombeo, la presión interna de los reactores, mediante un sistema de desfogue y válvula de control de presión.

**COMPRESOR DE AIRE.** Para este caso, el control se llevó a cabo de acuerdo a la relación de compresión (PD/PS) y dependiendo de este valor se corrige el flujo de entrada de aire, control de surge, mediante la filosofía delta P-Flujo.

**SOLOAIRE.** El control de este equipo se llevó a cabo mediante la manipulación del flujo de entrada y mediante el control de la temperatura de descarga. Por otra parte el **TANQUE DE RECUPERACIÓN** está provisto de un sistema de control de nivel que activa un sistema de bombeo.

**EVAPORADOR.** Presenta un sistema de control de temperatura en domo y uno de temperatura en fondo con recirculación de producto. La cantidad de refrigerante alimentado al cambiador de calor esta regulada de acuerdo a la temperatura de recirculación, cuenta además con un sistema de control de nivel y válvula de seguridad.

**REACTOR DE NEUTRALIZACIÓN.** Se regula la corriente de alimentación proveniente del evaporador, al mismo tiempo se regula la cantidad de dióxido de azufre que ingresa al equipo en base a la corriente de alimentación antes mencionada, el equipo cuenta con una chaqueta aislante que mantiene al reactor a temperatura constante mediante una corriente de proceso. El sistema de control de pH regula la cantidad de fenóxido de sodio que ingresa al equipo. Esta provisto con dispositivos de control de nivel que activan el sistema de bombeo.

**COLUMNAS DE DESTILACIÓN.** Las destiladoras se controlan de acuerdo al flujo de entrada, a la temperatura en domo y fondo y en base al nivel de la columna. Por otro lado, en sus tanques de recuperación se implementó un sistema de control de nivel.

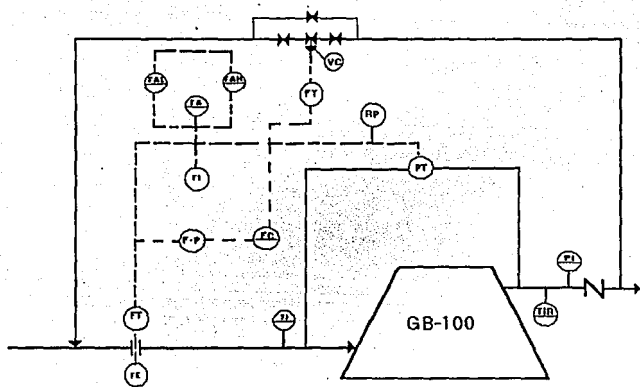


FIGURA 5.3 COMPRESOR DE AIRE INSTRUMENTADO  
BAJO LA FILOSOFÍA CAÍDA DE PRESIÓN-FLUJO.



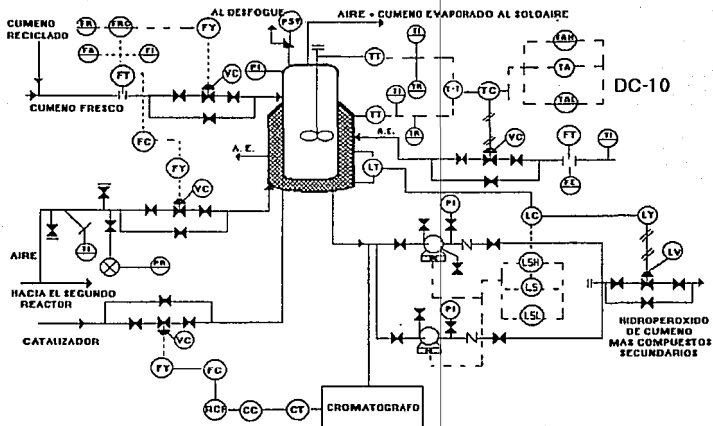


FIGURA 5.4 REACTOR DE OXIDACIÓN INSTRUMENTADO EN BASE A LA CONCENTRACIÓN DE PRODUCTOS.

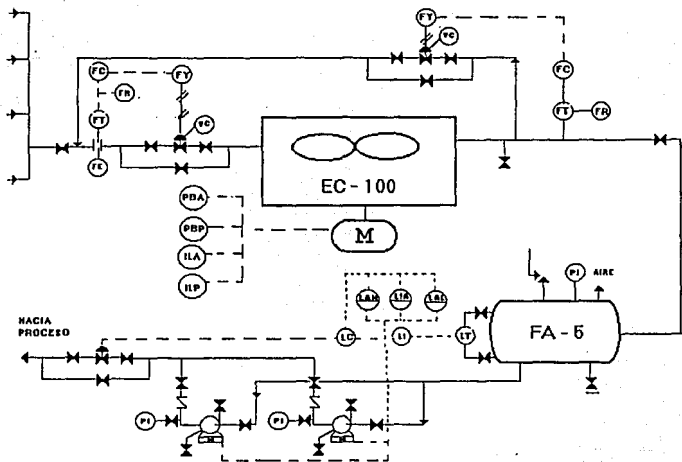


FIGURA 5.5 SOLOAIRE INSTRUMENTADO BAJO LA FILOSOFÍA QUE REGULA LA RAPIDEZ DEL MOTOR DE ACUERDO CON EL FLUJO.

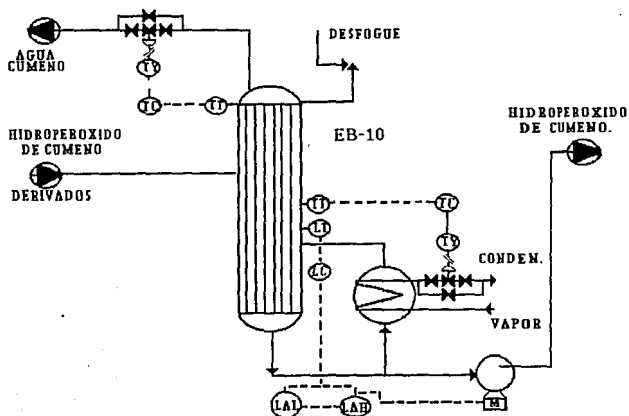


FIGURA 5.6 EVAPORADOR INSTRUMENTADO BAJO CONTROL DE TEMPERATURA.

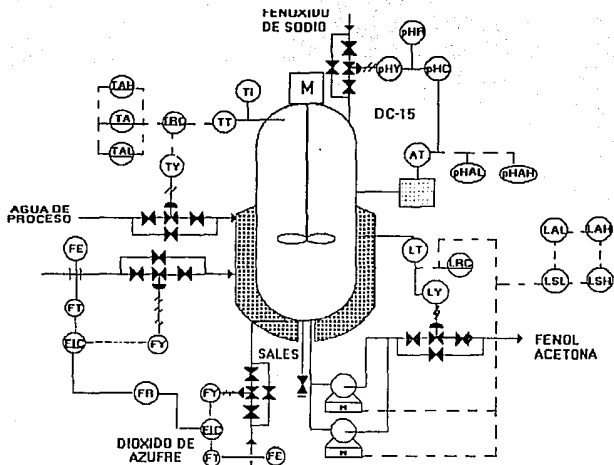


FIGURA 5.7 REACTOR AGITADO DE SEPARACIÓN FENOL-ACETONA CONTROLADO POR pH INTERNO.

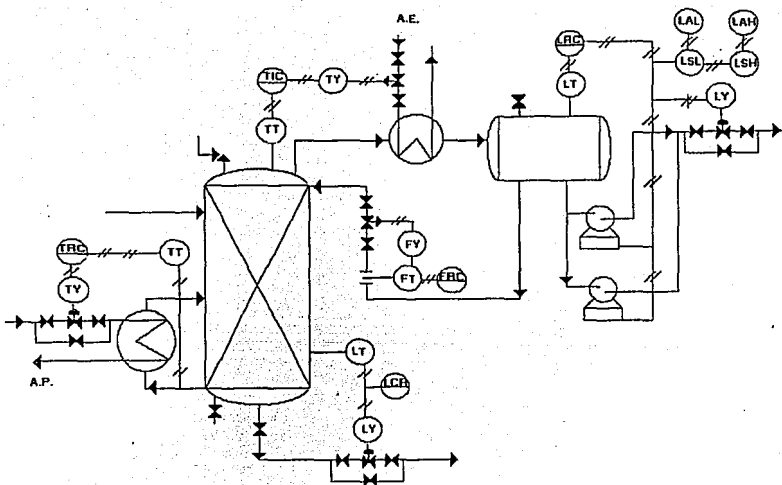


FIGURA 5.8 COLUMNA DE DESTILACION CONTROLADA POR BALANCE DE ENERGIA

### 5.3 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL DISTRIBUIDO AL PROCESO DE ACETONA.

El sistema elegido para la implementación del control fue el sistema DCI-4000 fabricado por Fisher & Porter, ya que ofrece gran flexibilidad de aplicación a casi cualquier proceso, adaptación a otros sistemas ya implementados y tiene posibilidad de ampliarse debido a que cuenta con programas especiales y una estructura totalmente descentralizada. Para implementar cualquier sistema de control distribuido es necesario conocer el número de loops manejados en el proceso y el tipo de variables manipuladas para establecer la Unidad de Control Distribuido (DCU) adecuada.

No solamente los anteriores criterios deben utilizarse para una adaptación, pues existen otros condicionantes como:

- El tipo y grado de criticidad del proceso a controlar.
- Alcance del presupuesto económico previsto para la inversión.
- Naturaleza del proyecto. Planta nueva, modificación o reconstrucción.
- Capacidad técnica del personal de operación y mantenimiento.
- Y como ya se mencionó antes, el número y naturaleza de los lazos del control.

Una vez establecidos los parámetros a analizar durante esta adaptación procederemos a listar el número de loops que son utilizados por los equipos del proceso, esto puede verse en las figuras 5.3 a 5.8.

EQUIPO	NÚMERO DE LOOPS
COMPRESOR	1
REACTOR	4
SOLOAIRE	2
EVAPORADOR	3
REACTOR AGITADO	4
COLUMNA DE DESTILACIÓN	4

### *DISPOSITIVOS BÁSICOS DEL SISTEMA DCI-4000 NECESARIOS EN EL PROCESO DE ACETONA.*

Antes de enunciar los dispositivos es conveniente decir que cada unidad de control distribuido puede manejar 8 ó 16 loops según se requiera. Analizando el proceso es fácil ver la existencia de muchas alternativas de selección de unidades de control distribuido; para el presente trabajo se dividieron todos los loops en secciones de 8 y 16.

A continuación aparece una lista en donde se muestran dichas agrupaciones:

DC-10, GB-100, EC-100 y FA-5	conjuntan 8 loops	sección 1
DC-11, DC-12 y DC-13	conjuntan 12 loops	sección 2
DC-15 y EB-10	conjuntan 7 loops	sección 3
DA-20 y DA-30	conjuntan 8 loops	sección 4
DA-40 y DA-50	conjuntan 8 loops	sección 5

Los grupos de equipos que conjunten más de 8 loops serán adaptados a un estándar de 16 loops.

### DISPOSITIVOS BÁSICOS.

1. Unidad de control distribuido (DCU). Ésta se elige de acuerdo al tipo de proceso y tipos de variables a controlar, en este caso como las variables fueron de tipo continuo como flujo, presión, temperatura, concentración y pH se eligió la unidad de control analógico (ACU), la cual tiene capacidad para controlar 8 entradas y 8 salidas.

DISPOSITIVO	NO. DE UNIDADES
ACU para 8 loops	2
ACU para 16 loops	2

DISPOSITIVO	NO. DE UNIDADES
2. Tablilla terminal del cliente para 8 loops (CTB)	6
3. Multiplexor (MUX).	4
4. Convertidor de señal A/D.	4
5. Convertidor de señal D/A.	4
6. Módulos de software de entrada.	4
7. Módulos de software de salida.	4
8. Controlador.	4
9. Tablillas de interconexión con el data highway.	2
10. Bus.	1
11. Data Highway de operación.	1
12. Data Highway de redundancia.	1
13. Consola central del operador (COP).	1
14. Consola local del operador (LOP).	2
15. Tubos de rayos catódicos (CRT).	10
16. Estación de mantenimiento.	1
17. Estación de ingeniería.	1
18. Estación de nivel superior.	1
<b>TOTAL DE EQUIPOS</b>	<b>55</b>

El proceso de producción de acetona, visto a través de los esquemas de instrumentación revelan la existencia de 42 loops principales a controlar lo que representa que el sistema de control distribuido debe manejar 84 señales analógicas y 84 señales digitales mediante la utilización de 55 dispositivos que conforman este sistema de control.

Se realizaron dos esquemas que permiten observar la interconexión de estos dispositivos de manera representativa; en el primero de ellos (figura 5.9) se representa el sistema de control distribuido DCI-4000 con los dispositivos básicos seleccionados para el funcionamiento de la



planta de acetona. Los dibujos en forma de válvula representan la existencia de un loop que requiere ser conectado al sistema distribuido, independientemente de la naturaleza de la variable a controlar (temperatura, presión o flujo). Por ejemplo: Un medidor de flujo (representado por un rectángulo) se conecta a la tablilla terminal del cliente (CTB), y esta terminal es conectada a su vez a un multiplexor (MUX) de entrada analógica<sup>3</sup>. La señal proveniente de éstos equipos es conducida a un convertidor analógico-digital (A/D), quien convierte la señal a un número representativo en porcentaje de la escala total y lo envía al módulo de software de entrada analógica, el cual lo transforma a una cantidad numérica representativa de la variable a medir, en este caso el flujo, (GPM). El valor anterior se alimenta a un controlador previamente programado, que contiene los algoritmos necesarios de control para cada caso (controlware).

Una conexión del controlador es conducida hacia el bus de datos, en donde la información contenida se ordena bajo un código preestablecido por el sistema, el cual envía la señal codificada al sistema de transporte de datos de alta velocidad (Data highway) que se encarga de establecer las comunicaciones entre las estaciones de mantenimiento, nivel superior e ingeniería, la consola central del operador (COP) con sus respectivos CRT's y las consolas locales del operador (LOP). La otra salida del controlador es trasladada al módulo de salida correspondiente y convertida en señal analógica mediante el uso de un convertidor digital-analógico (D/A). Tal convertidor se conecta a un par de terminales de la CTB que finalmente conducen la información a un actuador conectado a un elemento final de control.

Dentro de la figura 5.9 se ilustra la ACU como un rectángulo que contendrá el proceso de transferencia, transformación y algoritmo de control de la señal, dicho dispositivo esta conectado al BUS de datos, quien codifica en protocolo la información para que se verifique la acción de control. El BUS se une al DATA HIGHWAY, quien conecta la COP, las LOP's y las pantallas (CRT) a las estaciones de mantenimiento, de ingeniería y de nivel superior.

Por otra parte las figuras 5.10 a), b), c), d) y e) muestran las secciones en que se ha dividido el proceso y su interconexión con el sistema de control. Tales figuras representan una imagen supuesta del desplegado en proceso de cada una de las pantallas, equipos y periféricos, loops de control e interconexiones que utilizaría el sistema de control distribuido al adaptarse en campo al proceso.

De esta forma se han seleccionado todos los equipos básicos, sistemas de comunicación, de redundancia, cuartos de ingeniería y dispositivos especiales necesarios para llevar a cabo la adaptación de este sistema al proceso industrial de producción de acetona.

---

<sup>3</sup> La estructura de la ACU se representa en la figura 5.10 y en el desglose de la misma.

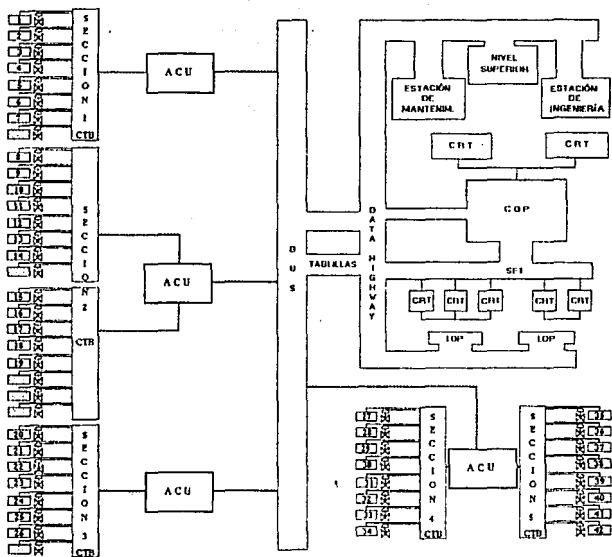


FIGURA 5.9 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DCI-4000 AL PROCESO DE ACETONA.

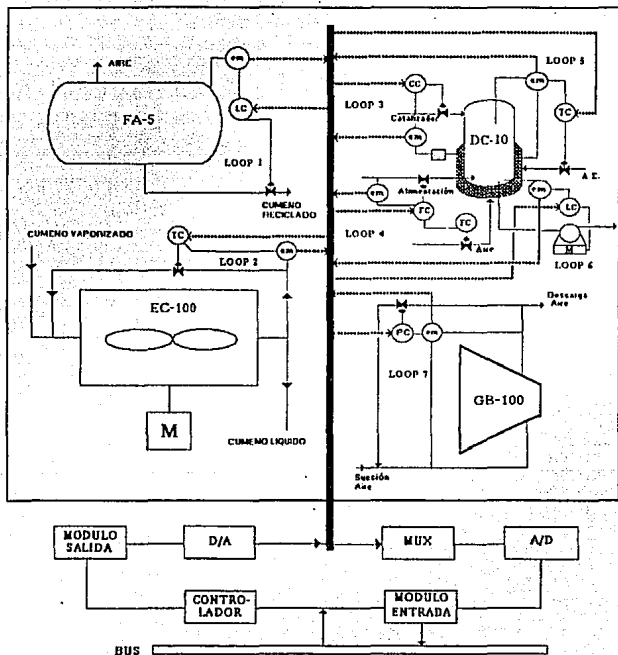


FIGURA 5.10 A) DESPLGADO DE PROCESO EN LA SECCION 1

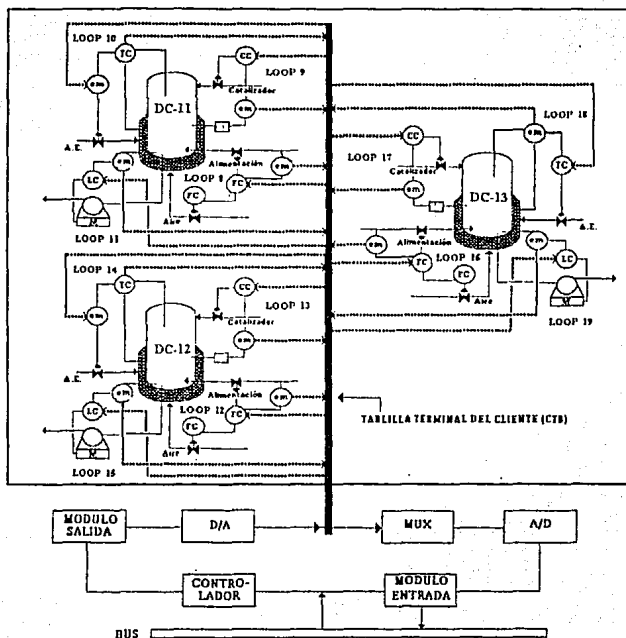


FIGURA 5.10 B) DESPLIEGO DE PROCESO EN LA SECCION 2

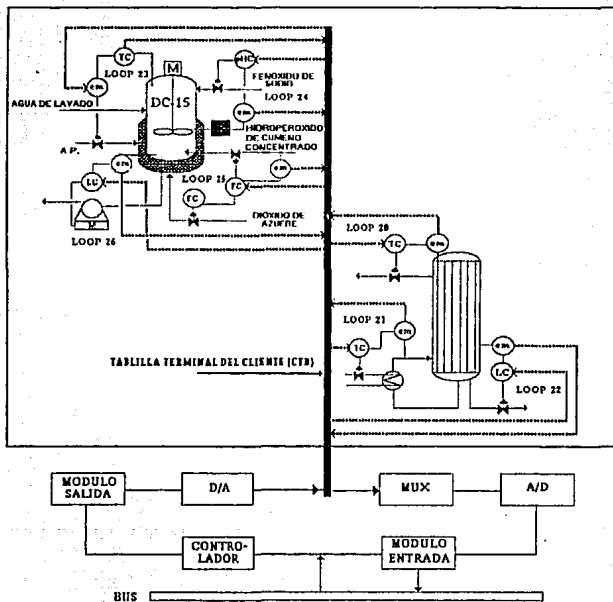


FIGURA 6.10 C) DESPLIEGO DE PROCESO EN LA SECCION 3

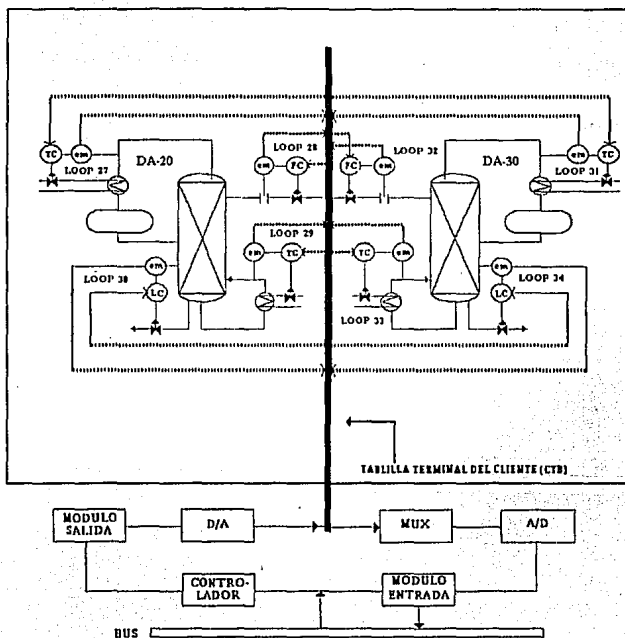


FIGURA 5.10 D) DESPLIEGADO DE PROCESO EN LA SECCION 4

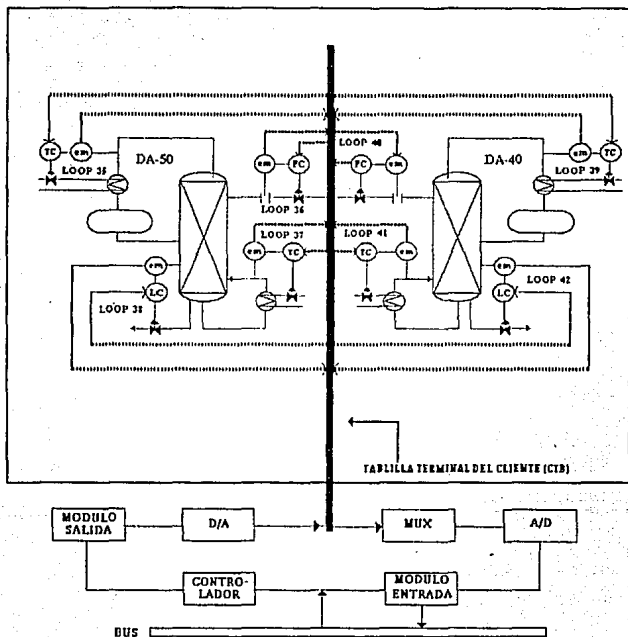


FIGURA 6.10 E) DESPLIEGO DE PROCESO EN LA SECCION 5

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se diseñaron los esquemas de instrumentación básica para el proceso "Kellogg" de producción de acetona, empleando la filosofía elegida en cada equipo. El objetivo de controlar tal proceso es optimizar las estrategias de producción y por lo tanto minimizar los recursos con el fin de obtener un proceso estable.

El primer intento de control, fué emplear la instrumentación convencional y sentar las bases para establecer la filosofía de control distribuido, la cual a su vez se basa en el establecimiento del número de loops a controlar en cada equipo. De ahí se seleccionó el número y el tipo de dispositivos adecuados para establecer el nuevo tipo de control automatizado.

Para poder aplicar el Sistema de Control Distribuido (DCS) al proceso de acetona, fué necesario establecer los conceptos básicos de control automático, para después entender y analizar la operación del DCI-4000, que fué el sistema que se adaptó al proceso industrial en cuestión. Dicho análisis involucra una descripción detallada de cada uno de los equipos y periféricos que funcionan en el DCI-4000.

Con este trabajo teórico-bibliográfico no se puede demostrar palpablemente que este sea el Sistema de Control Distribuido ideal para controlar una planta de acetona, así como tampoco se demuestra que el esquema desarrollado opere satisfactoriamente, pues sería necesario trabajar en campo para comprobar su eficiencia. Sin embargo, el estudio realizado permite concluir que los Sistemas de Control Distribuido por su evolución, desarrollo tecnológico, flexibilidad, confiabilidad y costos razonables, son una excelente opción para iniciar nuevas estrategias de control.

En México se han realizado algunos estudios con respecto al tema, con el fin de conocer los resultados de la aplicabilidad del control distribuido en las plantas de proceso. Un ejemplo de ello, es la rama de Refinación petrolera, en la cual se han implementado 6 sistemas de control distribuido y 2 están en proyecto. Los primeros 6 han mejorado notablemente el control de producción y de mantenimiento, lo cual indica que se han logrado implantar con éxito técnicas avanzadas de optimización.

En general, los actuales Sistemas de Control Distribuido experimentan una tendencia de continua mejora principalmente en la sencillez de diálogo hombre-máquina, la compatibilidad con otros sistemas, la complejidad de los algoritmos de control, la utilización de la fibra óptica y la utilización de sensores inteligentes, además de otras ventajas ya mencionadas.

De esta forma creemos haber cumplido con los objetivos propuestos y esperamos de antemano que este trabajo sea de gran utilidad para todas aquellas personas interesadas en el campo del control; sin embargo, no se debe olvidar que al ser este un espacio muy amplio de conocimientos requiere de nuevas investigaciones que mejoren la perspectiva que muestra este trabajo, por ejemplo: Con estudios financieros, con sistemas de comunicación avanzados, en el campo de la electrónica, etc..



Para finalizar, podemos afirmar que un Sistema de Control Distribuido es un medio con posibilidades prácticamente ilimitadas para el propósito de control, no sólo en los nuevos proyectos, sino también en la remodelación de plantas de proceso industrial ya existentes. De tal suerte que el mercado mundial de DCS's espera un crecimiento del 30% en los próximos 3 años.

# BIBLIOGRAFÍA

## LIBROS

1. BARRAGÁN, Pita Luis. *Los sistemas de control automático de tipo industrial; teoría y aplicación del control automático*. México, I.M.P., 1981.
2. BOYLESTAND, Robert. *Electrónica, teoría de circuitos*. 4a. edición. México, Prentice-Hall Hispanoamérica, 1989.
3. FELDER, Rousseau. *Principios básicos de los procesos químicos*. México, Moderno, 1981.
4. HAYKIN, Simón. *Sistemas de comunicación*. 2a. edición. México, Interamericana, 1985.
5. HILBURN, John & Paul Julich. *Microcomputers/microprocessors: Hardware, Software and applications*. New York, Prentice-Hall, 1976.
6. HOWARD, F. Rase & Barrow M. L. *Project engineering of process plants*. U.S.A., John Wiley & Sons, 1957.
7. KIRK, Othemer. *Encyclopedia of chemical technology*. Vol. 1. 4a. edición. U.S.A., Wiley Interscience, 1991.
8. LUYBEN, W.L. *Process, modeling, simulation and control for chemical engineer*. U.S.A., Mc Graw-Hill, 1990.
9. MORA, Blanco. *Introducción a la tecnología de control distribuido*. México, PEMEX, 1992.
10. NAGY, Iván. *Introduction to chemical process instrumentation*. Vol. 3. U.S.A., Elsevier, 1992.
11. PERRY, H. Robert. *Manual del Ingeniero Químico*. Vol. 6. 6a. edición. México, Mc Graw-Hill, 1992.
12. PITT, Martín & Paul E. Preece. *Instrumentation an automatitaton in process control*. England, Ellis Horwood Limited, 1990.
13. POLLARD, A. *Process control for chemical and allied fluid-processing industries*. Great Britain, Herneman Education Books, 1971.

14. SÁNCHEZ, De León José. *Control de los procesos industriales por computadora*. España, Paraninfo, 1987.
15. SMITH, Corripio. *Principles and practice of automatic process control*. U.S.A., Prentice-Hall, 1984.
16. STANLEY, M. Walas. *Chemical process equipment*. U.S.A.; Butterworth-Heinemann, 1990.
17. STEPHANOPOULOS, George. *Chemical process control*. U.S.A., Prentice-Hall, 1984.
18. ZOSS, M. Leslie. *Applied instrumentation in the process industries*. Vol. 2. U.S.A., Gulf Publish Company Book, 1979.

### ARTÍCULOS DE PUBLICACIONES PERIÓDICAS

1. Automática e Instrumentación. *Equipos y sistemas de control distribuido*. Núm. 197, diciembre de 1989.
2. Chemical Engineering. *Instrumenting a plant to run smoothly*. Vol. 84, Núm. 19, septiembre de 1977.
3. Chemical Engineering. *Understanding distribute control*. Vol.96, Núm. 5, mayo de 1989.
4. Chemical Engineeering Process. *Asses today's options in distributed control*. Vol. 86, Núm. 10, octubre de 1990.
5. Chemical Engineering Process. *Design your DCS to reduce operator error*. Vol. 87, Núm. 10, febrero de 1991.
6. Control and Instrumentation. *Instrumentation in the 70's*. Vol. 1, Núm. 1, mayo de 1969.
7. Automática e Instrumentación. *Equipos y sistemas de control distribuido*. Núm. 197 diciembre de 1989.
8. Hidrocarbon Processing. *Petrochemical Handbook'91*. Vol. 70, Núm. 3, marzo de 1991.
9. Hidrocarbon Processing. *Distill acetone in tower packing*. Vol. 70, Núm. 10, octubre de 1991.
10. Hidrocarbon Processing & Petroleum Refiner. *Some typical flow sheets and how they grow*. Vol. 42, Núm. 10, octubre de 1963.

11. The Journal of automation, control and instrumentation technology. *Control before the 20<sup>th</sup> century: Part 1*. Vol. 1, Núm. 3, julio de 1969.
12. The Journal of automation, control and instrumentation technology. *Control before the 20<sup>th</sup> century: Part 2*. Vol. 1, Núm. 4, agosto de 1969.

## DOCUMENTOS Y EXPOSICIONES

1. CUESTIONARIO TÉCNICO PARA EL SISTEMA DIGITAL DE CONTROL DISTRIBUIDO Y ADQUISICIÓN DE DATOS. Petróleos Mexicanos. Octubre de 1990.
2. CURSO INTERNACIONAL. Sistemas de control distribuido. Instituto Mexicano del Petróleo. Junio de 1985.
3. EXPOSICIÓN DEL SISTEMA KEYDIG. Instrumentación y robótica industrial. Keystone S.A. de C.V. Enero de 1994.
4. INSTRUMENTOS DE CONTROL. Mantenimiento 1, 2, 3 y 4. Instituto Mexicano del Petróleo. Subdirección de Desarrollo Profesional.
5. MANUAL DE REFERENCIA. Control automático. Honeywell. 1970.
6. PRACTICAL PROCESS INSTRUMENTATION. The staff of Chemical Engineering. McGraw Hill. 1980.

## APÉNDICE 1.

**MICROPROCESADOR** Es la unidad aritmética y lógica de una computadora. El microprocesador está constituido por una o varias pastillas de silicio, la cual contiene miles de transistores, resistores, diodos y otros elementos de un circuito electrónico. El microprocesador forma parte fundamental de un circuito integrado, mismo que al agregarle otros elementos para dotarle de temporización, memoria de programa, memoria de acceso aleatorio, circuito de señales de entrada y salida y otras funciones auxiliares, se transforma en una microcomputadora.

La función del microprocesador es la de recibir datos en forma de cadenas de dígitos binarios (ceros y unos), almacenarlos, para luego procesarlos, realizar operaciones aritméticas y lógicas con los datos de acuerdo a las instrucciones dadas y entregar los resultados al usuario a través de un mecanismo de salida.

**INTERFASE CON EL CAMPO.** Las interfases con el campo son dispositivos electrónicos estructurados en forma modular, los cuales tienen como función recibir señales provenientes del campo, de sensores de temperatura, presión, nivel, flujo, velocidad, pH, peso específico, viscosidad, etc., los cuales también son llamados dispositivos de interfase de entrada, y existen otros que se encargan de enviar las señales hacia los dispositivos finales de control como válvulas, actuadores, motores, etc ; llamados dispositivos de interfase de salida.

**INTERFASE CON EL OPERADOR.** La interfase con el operador es aquella parte en donde se encuentran centralizadas todas las señales provenientes del proceso, así como todos los dispositivos con los que cuenta el operador para supervisar y controlar el proceso. Estos dispositivos se encuentran instalados en la estación del operador o consola.

**MULTIPLEXOR** Es un dispositivo que se encarga de reunir las señales procedentes de los transductores de campo para jerarquizar el uso de la línea de comunicación que lleva la señal a los convertidores analógico-digital. Este dispositivo puede actuar por frecuencia de señales, por tiempo de entrada o por programa (software).

**DISPLAY.** Son desplegados de información alfanumérica y gráfica en pantalla, los cuales proporcionan la información necesaria al operador para monitorear el proceso, manipular los parámetros y formar decisiones

Los desplegados en pantalla pueden ser de varios tipos:

1. De vista general. Permite observar en forma analógica por medio de barras la operación de los controladores, presentados en grupos de 8 ó 16 loops de control.
2. De grupo. Permite observar hasta 16 controladores, indicando para cada uno el nombre del controlador, valor de la variable controlada, valor del setpoint, límites de la variable controlada, indicaciones de estado de alarma, unidades de ingeniería, etcétera.

3. De detalle. Además de la información anterior éste incluye la representación numérica de todas las variables y parámetros de cada loop de control.
4. De tendencia. Especifica lapsos de tiempo, nos da los registros históricos de tendencia de las variables en gráficos a colores, desplegados en tiempo real.
5. De valores promedio. Permite al operador observar el comportamiento de una o más variables del proceso al desplegar en forma tabular los valores promedio por hora durante un lapso determinado de tiempo.
6. Gráfico. Muestra en forma esquemática partes del proceso, indicando dinámicamente los valores de las variables más importantes.
7. De sumario de alarmas. Alerta al operador cuando una variable entra en estado de alarma y muestra una lista de las alarmas en el orden en que han ocurrido.
8. De diagnóstico de equipo de control y sistemas de comunicación. Permite supervisar continuamente los componentes de control, la operación de los archivos de los controladores y las unidades de interfase con el proceso.

**ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE CONTROL.** Existen varias arquitecturas con ventajas y desventajas pero la característica general en todos los arreglos es tener controladores remotos, interfase con el operador, una red de control y un pista de datos.

**CONTROLADOR.** Es el cerebro del módulo de control, cuyo corazón es un microprocesador de 8, 16 ó 31 bits de longitud de palabra. Este realiza el direccionamiento, la sincronización y el control de todos los elementos del módulo de control; cuenta con unidades de memoria en donde se encuentra almacenado su sistema operativo y todos los algoritmos de control que permiten el control de procesos.

**SOFTWARE.** Incluye todos los programas, lenguajes y procedimientos necesarios para que los equipos de DCS arranquen, operen, se configuren, reparen y reciban mantenimiento.

**DATA HIGHWAY O PISTA DE DATOS.** Es una conexión de alambres que incluye hardware y software para envío de información por bloques, para manejar una gran cantidad de loops de control, la información la lleva a cabo una microcomputadora llamada "directora de tráfico" de la pista de datos. Puede ser un par de alambres torcidos, cables coaxiales o fibra óptica, con longitud de unos metros hasta kilómetros; gracias a su alta velocidad no se requiere alambrar cada uno de los loops de control.

**CONVERTIDOR A/D.** Este dispositivo convierte la señal analógica en un valor digital compatible con el lenguaje del procesador.

**FIRMWARE.** Es una serie de programas e instrucciones que son parte interna del procesador,

localizadas en la memoria ROM. Estas instrucciones son transparentes al usuario.

**HARDWARE.** Representa el equipo o maquinaria usada en un sistema que utiliza computadora con sus dispositivos periféricos.

**SEÑALES ANALÓGICAS.** Son representaciones continuamente proporcionales de la medición. La mayoría de los *transductores analógicos* producen señales de alto nivel, las cuales son definidas como mayores de 1 volt. Algunos instrumentos producen señales de bajo nivel por ejemplo 1 ó 10 milivolts, tal es el caso de las celdas de medición de pH, algunos cromatógrafos y en general para muchos aparatos de laboratorio.

**SEÑALES DIGITALES.** Sirven para indicar estados normales o anormales por medio de contactos, indicar unidades discretas de medición, para energizar o desenergizar motores, bombas, etcétera. Muchos instrumentos como medidores de turbinas, contadores y básculas producen señales de salida digitales. Esta puede ser un simple pulso, un arreglo de pulsos en paralelo o en serie que llevan la señal.

**CONTROLWARE.** Es un sistema de "programación" a través de módulos tales como extractores de raíz cuadrada y módulos de cálculo en general, diseñados para la ingeniería de instrumentación de procesos y cuya implementación en los esquemas de control son fácilmente configurables a través de su terminología.

**FLEXIBILIDAD.** La arquitectura del DCS debe tener los dispositivos requeridos para la modificación o expansión del sistema, a ésto se le llama flexibilidad.

**TRANSDUCTOR.** Es un dispositivo que al ser afectado por la energía de un sistema de transmisión, proporciona energía en la misma forma o en otra a un segundo sistema de transmisión. Esta transmisión de energía puede ser eléctrica, mecánica, química, óptica (radiante) o térmica. Principalmente convierte cantidades no eléctricas a una señal eléctrica con el fin de emplear técnicas de medición, manipulación o control.

## APÉNDICE 2

LETRAS PARA IDENTIFICACION, DEFINICIONES Y POSICIONES PERMITIDAS EN CUALQUIER COMBINACION.

LETRAS	1A. LETRA VARIABLE DE PROCESO	2A. LETRA TIPO DE REGISTRO	3A. LETRA FUNCIÓN ADICIONAL
A	-	ALARMA O ANALIZADOR	ALARMA
C	CONDUCTIVIDAD	CONTROL	CONTROL
D	DENSIDAD	DIFERENCIAL	-
E	-	ELEMENTO PRIMARIO	-
F	FLUJO	RELACIONADOR	-
G	-	CRISTAL	-
H	MANUAL	-	-
I	-	INDICADOR	-
L	NIVEL	-	-
M	HUMEDAD	-	-
P	PRESIÓN	-	-
R	-	REGISTRADOR	-
S	RAPIDEZ, VELOCIDAD	INTERRUPTOR	-
T	TEMPERATURA	TRANSMISOR	TRANSMISOR
V	VISCOSIDAD	-	VÁLVULA
W	PESO	POZO	-
Y	-	CONVERTIDOR	-



**IDENTIFICACIONES GENERALES.  
MECANISMOS CONTROLADORES**

	LETRA DE VARIABLE DE PROCESO	REGISTRO	INDICACIÓN	
		-RC	-IC	-C
FLUJO	F	FRC	FIC	
NIVEL	L	LRC	LIC	LC
PRESIÓN	P	PRC	PIC	PC
DENSIDAD	D	DRC	DIC	DC
MANUAL	H		HIC	HC
CONDUCTIVIDAD	C	CRC	CIC	
RAPIDEZ	S	SRC	SIC	SC
VISCOSIDAD	V	VRC	VIC	
TEMPERATURA	T	TRC	TIC	TC

## MECANISMOS CONTROLADORES. VÁLVULAS.

	VARIABLE DEL PROCESO	VÁLVULAS REGULADORAS ACTUADAS POR SI MISMAS	VÁLVULAS DE SEGURIDAD (RELEVO)
		CV	SV
PRESIÓN	P	PCV	PSV, PVSV
NIVEL	L	LCV	-
MANUAL	H	HCV	-
RAPIDEZ	S	SCV	SSV
FLUJO	F	FCV	-
TEMPERATURA	T	TCV	TSV

## MECANISMOS DE MEDICION

	VARIABLE DE PROCESO	REGISTRO	INDICACION
		R	I
FLUJO	F	FR	FI
NIVEL	L	LR	LI
PRESION	P	PR	PI
DENSIDAD	D	DR	DI
MANUAL	H	///	///
CONDUCTIVIDAD	C	CR	CI
RAPIDEZ	S	SR	SI
VISCOSIDAD	V	VR	VI
PESO	W	WR	WI
TEMPERATURA	T	TR	TI

\* Los espacios con los guiones transversales indican combinaciones posibles.

**APARATOS DE CRISTAL Y MECANISMOS DE ALARMA.**

	APARATO DE MEDICIÓN	REGISTRO DE ALARMA	INDICACIÓN DE ALARMA	ELEMENTO PRIMARIO
	G	RA	IA	E
FLUJO	FG	FRA	FIA	FE
NIVEL	LG	LRA	LIA	FE
PRESIÓN	///	PRA	PIA	PE
DENSIDAD	///	DRA	DIA	
MANUAL	///	///	///	///
CONDUCTIVIDAD	///	CRA	CIA	CE
RAPIDEZ	///	SRA	SIA	
VISCOSIDAD	VC	VRA	VIA	
PESO		WRA	WIA	WE
TEMPERATURA	///	TRA	TIA	TE

\*Los espacios con los guiones transversales indican combinaciones posibles.