



2
2ej

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
" ARAGON "**

FALLA DE ORIGEN

**CONTROL DE PROCESOS POR LOTES
(TIPO BATCH)**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO EN COMPUTACION**

**P R E S E N T A:
JUAN CARLOS ALTUZAR COELLO**



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
AVENIDA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCION

JUAN CARLOS ALTUZAR COELLO
P R E S E N T E .

En contestación a su solicitud de fecha 10 de agosto del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que la profesora, Ing. SILVIA VEGA MUYTOY pueda dirigirle el trabajo de Tesis denominado "CONTROL DE PROCESOS POR LOTES (TIPO BATCH)", con fundamento en el punto 6 y siguientes del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"

San Juan de Aragón, Edo. de Méx., Agosto 18 de 1993

EL DIRECTOR

M. en C. CLAUDIO C. HERRIFIELD CASTRO



- c c p Lic. Alberto Ibarra Rosas, Jefe de la Unidad Académica.
- c c p Ing. Juan Gastaldi Pérez, Jefe de Carrera de Ingeniería en Computación.
- c c p Ing. Silvia Vega Muytoy, Asesor de Tesis.

CCMC/AIR/eva



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA 14
MEXICO

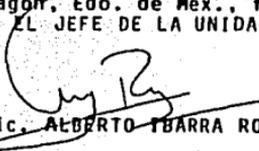
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
PROFESIONALES
UNIDAD ACADÉMICA
ARAGON

Ing. SILVIA VEGA MUYTOY
Jefe de Carrera de Ingeniería
en Computación,
P r e s e n t e .

En atención a su escrito de fecha 9 de febrero del año en curso, por la que se comunica que el alumno JUAN CARLOS ALTUZAR COELLO de la carrera de INGENIERO EN COMPUTACION, ha concluido su trabajo de investigación intitulado "CONTROL DE PROCESOS POR LOTES (TIPO BATCH), y como el mismo ha sido revisado y aprobado por usted, se autoriza su impresión, así como la iniciación de los trámites correspondientes para la celebración del examen profesional.

Sin otro particular, le reitero las seguridades de mi atenta consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
San Juan de Aragón, Edo. de Mex., febrero 9 de 1995
EL JEFE DE LA UNIDAD


Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS

c c p Asesor de Tesis.
c c p Interesado.

AIR/eva

A ti, Dios ...

A mis padres:

Blanca Coello de Altuzar,
Salomón Altuzar Argüello.

Gracias por traerme al
mundo, y por todo el apoyo
que me han brindado.

A mis hermanas y hermano:

LuzMa',
Blanquita,
Lety,
Paty,
Sonia,
Irma,
Miriam y
Luis.

Gracias, por que siempre
estuvieron ahí, cuando los
necesité.

A mis cuñados y cuñadas:

Carlos,
Tofio,
Eduardo,
Joaquín,
Fernando,
Luis,
Ernesto,
Ana María,
Cheryl,
Debbie
Harry,
Garry.

Gracias a su ejemplo soy
lo que soy.

A mis suegros:

Robert Feasey &
Carolyn Feasey.

Gracias por aceptarme en su
familia.

A mis tias y tío:

Guty,
Loly,
Güichita.

Gracias por darme su amor
y comprensión.

A mis amigos:

M. Alberto Estrada A.
Lisa Estrada.

Gracias por brindarme su amistad.

A mis profesores:

**Por estar día con
día en mi formación
profesional.**

A ti: Karen,
porque eres mi vida.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	3
I. CONCEPTOS GENERALES	10
I.1 Que es Automatización	10
I.2 Automatización Moderna	11
I.3 Principios de la Automatización	13
I.4 Aplicaciones	14
II. TIPOS DE PROCESOS QUE SE PUEDEN CONTROLAR	16
II.1 Tipos de Procesos	16
II.2 Tipos de Control	22
II.2.1 Control Digital Directo (DDC)	23
II.2.2 Control Supervisor	26
II.2.3 Control Distribuido	27
II.3 Control de Procesos	31
III. PROCESOS POR LOTES (TIPO BATCH)	34
III.1 Acciones de Control	35
III.2 Selección del Sistema de Control	44
III.3 Dimensiones de los Procesos por Lotes .	45

IV. DESARROLLO DE UN PROCESO REAL	50
IV.1 Control Distribuido de Procesos por Lotes	50
IV.2 Criterio de Diseño para un Sistema de Control Distribuido de un Proceso por Lotes	52
IV.3 Control de Procesos en una Planta Química	54
IV.4 Composición General del Equipo de Control	54
IV.4.1 Control de Reactores	55
IV.4.2 Control de Torres de Enfriamiento	59
IV.4.3 Control de Calderas	60
CONCLUSIONES	62
APÉNDICE A	64
APÉNDICE B	100
BIBLIOGRAFÍA	104

Los robots hacen muchas cosas de uno mismo, que uno nunca había conocido.

Carly Irons

INTRODUCCIÓN

Una computadora no puede hacer muchas cosas por sí sola, necesita algún tipo de comunicación con el medio exterior y para ello debe tener el control sobre circuitería externa, es decir, circuitería que sea capaz de mover motores o manejar datos.

Pues bien, para poder llevar a cabo la conexión con todo este tipo de circuitos externos se requiere de la ayuda del ingeniero de sistemas de control, el cual está interesado en el conocimiento y control de una parte de su medio ambiente, frecuentemente conocido como *sistema*, a fin de proporcionar un producto económico y útil para la sociedad. Los objetivos del conocimiento y del control son complementarios ya que, para poder controlar más efectivamente, el sistema bajo control debe ser conocido y modelado. Además, la ingeniería de control debe considerar frecuentemente sistemas poco conocidos tales como los procesos químicos.

El desafío presente a los ingenieros de control es el modelado y control de sistemas interrelacionados modernos y complejos como los de control de tráfico, los de procesos químicos y los de regulación económica. Sin embargo, simultáneamente, el afortunado ingeniero tiene

la oportunidad de controlar muchos útiles e interesantes sistemas de automatización industrial. Quizás la cualidad más característica de la ingeniería de control es la oportunidad de controlar máquinas y procesos industriales para beneficio de la sociedad.

La ingeniería de control se basa en los fundamentos de la teoría de la retroalimentación y el análisis de sistemas lineales, e integra los conceptos de las teorías de redes y comunicación. Por tanto, la ingeniería de control no está limitada a ninguna disciplina de la ingeniería sino que es igualmente aplicable a las ingenierías aeronáutica, química, mecánica, del medio ambiente, civil y eléctrica. Por ejemplo, muy frecuentemente un sistema de control incluye componentes eléctricos, mecánicos y químicos. Además, al aumentar el conocimiento de la dinámica de los sistemas comerciales, sociales y políticos, también se incrementará la habilidad para controlar estos sistemas.

A continuación se muestran algunas de las muchas aplicaciones de la computadora:

La computadora puede contestar su teléfono, satisfacer los requerimientos de inventario del negocio, ayudarle a escribir esos largos y complejos reportes, corregir su ortografía o dar acceso a la información contenida en un equivalente de cientos de librerías al rededor de todo el mundo. Le puede ayudar a analizar problemas difíciles de financiamiento y, hasta le permite jugar con la optimización de las soluciones de su negocio. También le puede ayudar, en el hogar, haciendo las finanzas personales y muchos tipos de correspondencia.

Hay doctores que utilizan la Computadora Personal para monitorear muchas partes de un procedimiento de cirugía. Un ministro en California hasta programó su computadora de tal forma que puede llevar a cabo una ceremonia de matrimonio. Un grupo de rock usa la computadora personal para controlar sus efectos especiales durante el concierto.

Como se puede ver, las aplicaciones de la computadora personal pueden llegar a ser infinitas, ya que puede abarcar desde el área industrial, hasta la científica e, inclusive la artística.

Ahora que tenemos una visión general de los inicios de la computadora, la siguiente porción del capítulo nos ayudará a tener una visión más general acerca del uso de la computadora y qué influencia tiene dentro de nuestras vidas.

Computadoras en el Transporte

Controladores de tráfico aéreo. El control, por medio de computadoras, del tráfico aéreo es esencial para mantener en orden la situación de las nuevas aeronaves. Dichos controladores son capaces de controlar las salidas, llegadas de vuelos y evitar el

congestionamiento en los aeropuertos. También están provistos de un control contra colisiones aéreas.

El sistema de tráfico aéreo controlado por computadora utiliza, como elemento principal, un radar de alta precisión, para localizar las aeronaves. El radar genera una señal luminosa que se puede comunicar con una unidad transmisora localizada en el interior del vehículo en vuelo. El instrumento transmite automáticamente una señal de regreso que contiene información como la identidad de la nave, su altitud, y su velocidad.

Sistemas simuladores de vuelo. Las computadoras son empleadas extensamente para sistemas simuladores de vuelo. La razón es porque pueden ser usadas para entrenar y examinar a los pilotos en la operación de una aeronave real, sin la necesidad de arriesgar vidas. También son utilizados para propósitos de investigación, esto es, para que el piloto experimente los resultados o características de una aeronave, antes de ser construida. La caseta está montada en un conjunto de amortiguadores hidráulicos, para dar al piloto una esencia más realista del vuelo; hasta los sonidos son generados artificialmente.

Para hacer que el piloto pueda observar lo que, supuestamente está sucediendo afuera del avión, la escena visual es mostrada por medio de una pantalla de televisión, en el interior de la cabina, a parte de todos los movimientos hechos por los brazos hidráulicos, es decir, en la cabina se deben sentir los movimientos de ascenso, descenso y vueltas; simulando los de un aeroplano real.

Sistema de transporte colectivo. El uso de la computadora en el sistema de transporte colectivo se incrementa cada vez más. Dentro de los diferentes usos que figuran como el de soporte, o el número actual de gente que usa una determinada línea del sistema de transporte colectivo durante las diferentes horas; la computadora nos puede mostrar una lista del número total de trenes que necesita el sistema a diferentes horas, para cubrir la demanda. Por otro lado, existe una computadora central, la cual puede, con sensores colocados a lo largo de las vías, determinar la posición de cada tren, todo esto con el fin de mantener una velocidad ideal, mientras se controla la distancia entre los trenes. Tal sistema de control también es utilizado para controlar el tiempo que el tren debe detenerse en cada estación y, hasta la apertura y cierre de puertas de acceso. Aunque todo el sistema de transporte colectivo es operado, en su totalidad, por computadora, se necesitan operadores humanos para que los pasajeros estén seguros de que, si la computadora sufre alguna falla, el operador tomará el mando, haciéndolo todo manualmente. Los operadores que están al mando de los tableros de información, instalados en cada terminal de las líneas que conforman la red del sistema de transporte colectivo, pueden observar los sistemas de trenes y, si ocurre alguna emergencia, pueden conducir el tren, para que opere a su mínima velocidad.

Automóviles inteligentes. Mientras más avanza la tecnología, más aplicaciones se le hallan a la computadora. Y su aplicación dentro de la industria automotriz no se queda atrás, su uso dentro de esta área se incrementa en muchos aspectos, como son el diseño, planeación y producción de automóviles. Durante los últimos 30 años, se han experimentado 17 sistemas electrónicos automotrices, de los cuáles dieciséis están en uso. Todos estos sistemas nos apoyan mucho en las áreas de mantenimiento, economía de combustible, comodidad para viajes, información de fallas eléctricas y mecánicas. Lo que ha hecho posible todo esto es el microprocesador, el cuál ha sido utilizado por muchos años para controlar el funcionamiento de motores con el fin de economizar combustible.

Los instrumentos utilizados para los automóviles están llegando a ser considerablemente más precisos e informativos, como resultado del avance en la electrónica. El vehículo contiene sofisticados tableros, dentro de los que se ven centros completos de información, controladores de freno, de luces, niveles de fluidos y otro tipo de datos que se utilizan en el viaje como la hora, fecha, velocidad, nivel de combustible, etc. Algunos sistemas pueden comunicarse con el conductor por medio del lenguaje hablado. En fin, por medio del rápido avance de la electrónica, estas aplicaciones serán más comunes dentro de las nuevas generaciones de automóviles.

Librerías Electrónicas. Se necesita mucho espacio y tiempo para poder tener una buena librería. También se requiere de mucho dinero para cubrir el monto de una construcción suficientemente buena para almacenar el interminable incremento de libros, revistas, periódicos y reportes anuales. Además de todo esto se necesita personal calificado para ayudar a la gente a encontrar alguna publicación. Pero estos problemas se pueden solucionar por medio de la computadora, es decir, la computadora es más rápida y tiene más capacidad, en cuanto almacenaje de información, que un catálogo. Por el momento las librerías están comisionadas para libros, pero esto es porque el costo de convertir las librerías existentes en una forma de almacenamiento electrónico es enorme. Los desarrollos en algunas editoriales, para escribir un libro en una computadora, para propósitos de edición y formatos, está tomando una prioridad frente a la de imprimir las publicaciones, lo cuál podría ser una solución, ya que no se tendría que contratar tanto personal para dirigir el proceso de impresión y, por supuesto, se ahorraría mucha electricidad. Además la información, por ejemplo para los periódicos y revistas, podría estar más tiempo almacenada, sin ocupar tanto espacio, cosa que ya hace el *New York Times*, manteniendo, en una base de datos, todas sus noticias.

Hasta la fecha hay muy pocas librerías electrónicas, una de ellas es la *Academia Americana*. En 1982, el servicio tenía ya unos 100,000 suscriptores, incluyendo 200 librerías públicas y universitarias en tres estados.

Otra buena aplicación, aparte de buscar la localización de una publicación por medio de una computadora y no en fichas

bibliográficas, utilizando una base de datos, es la de escribir los libros en discos flexibles (disquetes). Estos discos tienen una enorme capacidad, alrededor de tres millones de caracteres. Por ejemplo un disco flexible de tres y media pulgadas puede almacenar un texto equivalente a 1500 libros, por lado. Sistemas de microprocesadores de video discos son utilizados actualmente en la educación, para los negocios y para pedir información en supermercados. Probablemente su mayor uso, como instrumentos de almacenamiento masivo de información, será en las librerías y en el hogar.

Computadoras en las Artes

El uso de las computadoras en las artes se ha ido incrementado durante la última década. Hay muchas áreas, dentro de las artes, en las que se podría utilizar la computadora, tanto para propósitos creativos como prácticos. Por ejemplo, hay muchos museos en los Estados Unidos que ocupan la computadora como asistente en la búsqueda de alguna obra de arte localizada en un museo de la zona. Esto es posible, por que se tiene una base de datos que relaciona a muchos museos, tal base de datos tiene que ser del mismo tipo, porque de lo contrario sería imposible.

Artes visuales. Hoy en día la computadora tiene un gran uso dentro de las artes, su aplicación se divide en dos áreas que son el arte fino y el aplicado. Dentro del arte aplicado, la computadora es usada extensamente en la arquitectura y diseño estructural. Sin embargo, se estima que, al rededor del 99 por ciento del tiempo gastado en el diseño, se ocupa haciendo cálculos y cambios al plano original y, solamente un porcentaje de 1 para la creatividad. Pues bien, con el uso de la computadora esto se podría arreglar, ya que, metiendo el plano original en la computadora, nos podría asistir en cualquier error que llegáramos a tener, esto es, diciéndonos qué líneas están mal trazadas, ya que no están geoméricamente correctas, presentando cualquier perspectiva o tamaño de escala, también nos puede asesorar en las estructuras y en los costos. Este tipo de aplicación toma el nombre de diseño asistido por computadora (CAD).

Pinturas. Los artistas utilizan la computadora de muchas maneras, para producir arte gráfico. Una manera de hacerlo es por medio de un hardware especial que consiste de un convertidor de analógico a digital (A/D), el cual convierte la pintura o fotografía ordinaria a un archivo compatible con la computadora, que puede ser almacenado y más tarde, con los cambios deseados, ser impreso; obra que será completamente artística, ya que tendrá las técnicas de dramatización y efectos creativos del propio autor. Otro de los usos, es el de producir gráficas elaboradas, representaciones de fórmulas matemáticas, que da como resultado formas geométricas complejas que pueden ser impresas en un plotter o en pantallas con capacidad para gráficos. Finalmente, uno de los métodos más sofisticados es cuando el artista expresa sus ideas por medio de un programa de computadora. Este procedimiento es bastante difícil ya que para lograrlo el artista debe tener muy claras sus ideas y formularlas dentro de un limitado

lenguaje de programación. En este caso el artista no reproduce una gráfica hecha previamente, sino que le dice a la computadora que produzca alguna obra de arte que cumpla con los requerimientos especificados por el autor, reglas que tendrán el estilo y la expresión muy singular de él.

Animación. Quizás las formas más conocidas de animación son las que vemos continuamente en los comerciales de televisión y en algunas películas de cine. Sin embargo algún tipo de animación, relativamente sofisticada, puede ser hecha en una pequeña microcomputadora y, con la cuál, es posible producir una animación con una calidad parecida a la que vemos en el cine y la televisión, y a un costo mucho menor. Las computadoras son situadas para animación porque para esto se necesita mucho tiempo, es decir, para reproducir un minuto de película se tienen que hacer alrededor de 1,440 dibujos. El impacto de la computadora dentro de la animación es tan grande, que la mayoría de las empresas, que están haciendo sus propagandas por televisión, hacen sus comerciales de tal forma que su logotipo cruce la pantalla del televisor, tomando diferentes formas, las cuales son producto de los efectos permitidos por la animación por computadora y, a un menor costo que con los métodos anteriores.

Música. Dentro del campo de la música existen dos áreas con las cuales está envuelta la computadora, éstas son la grabación y la reproducción de música.

Grabación. Para poder hacer una mejor grabación, utilizando la computadora como filtro, para suprimir algunos ruidos del estudio de grabación, se necesita un equipo especial que convierta la voz humana, que es una señal analógica, a una señal digital, esto se hace, como es sabido, por medio de un convertidor de analógico a digital. Después de todo este proceso, la grabación final resulta de gran calidad. Pero se logra un mejor resultado cuando se ocupa un equipo completamente digital, para grabar y reproducir. Cuando la música es grabada, directamente en su forma digital y tocada sobre un equipo sofisticado de computadora digital, toda la distorsión, gis, tronidos y otros sonidos producidos por el medio ambiente del estudio de grabación, son esencialmente eliminados. Cuando dicha grabación es tocada a través de un microprocesador, el código digital es descodificado, sin ninguna clase de ruido, y después convertido a una señal analógica, libre de distorsión, que va directamente a las bocinas.

Producción de Sonido. Todo el mundo conoce los sintetizadores de sonido que existen en el mercado desde hace más de una década. Sin embargo hay muchos grupos de rock que no se limitan a utilizar un simple sintetizador sino que ocupan la tecnología del microprocesador integrada en estos sistemas.

Básicamente hay dos tipos de sistemas disponibles: Uno que está hecho completamente de hardware, el cuál tiene un teclado parecido al de un sintetizador, que sirve de entrada y que ocupa la computadora para controlar las señales; y el otro que consta de filtros que

producen sonidos y que son amplificados después a través de la bocina, estos son conectados directamente a la computadora.

Generalmente es más barato el sintetizador hecho de hardware que el de software. La razón estriba en que el sistema de hardware necesita menos capacidad de almacenamiento para controlar la reproducción del sonido. En cambio el sistema de software es más caro ya que utiliza mucha memoria, RAM y de disco, además de que es un poco más lento, porque tiene que crear diferentes señales para hacer música. Sin embargo se piensa que los sistemas basados en software prometen más, en cuanto a la creatividad, porque estando dentro del control de un sistema, bien diseñado se software, el músico tiene más posibilidades de exploración, hacia un nuevo tipo de música.

La mejor manera de tener una buena idea es tener muchas ideas.

Louis Pasteur

I. CONCEPTOS GENERALES

I.1 QUÉ ES AUTOMATIZACIÓN

Otra de las aplicaciones dentro de las que está teniendo mucho auge la utilización de la computadora es el área industrial. Esto se debe a los grandes beneficios que ofrece este tipo de herramienta; dentro de los cuales se encuentra una mayor calidad en el producto final, un proceso de fabricación mas seguro, tiempos muertos muy cortos, por lo que se aumenta la producción y se puede economizar en cuanto a mano de obra, accidentes de trabajo y producto rechazado corresponde. Ahora bien, para poder hacer todo esto posible, necesitamos que nuestro proceso sea automático, pero nos encontramos con que mucha maquinaria con la que contamos dice ser automática, es decir, obedece a ciertos parámetros previamente especificados por el operador o ingeniero de proceso, por lo tanto antes de continuar debemos entender lo que significa la palabra *automatización*.

Hace mucho que conocemos las palabras automático, autómeta y hasta automatismo, pero la palabra automatización es muy reciente en nuestros diccionarios. Esencialmente, hay muy poca diferencia entre el significado de las palabras automatizado y automático y, prácticamente esa diferencia es muy poco significativa.

Desde hace mucho tiempo ha habido máquinas que tienen mecanismos que se regulan por sí mismos, y que son capaces de ejecutar los actos que se requieran en puntos predeterminados de una operación. Después que se ajustan, esas máquinas funcionan automáticamente; sólo es necesario proporcionarles material y energía, y lubricarlas. ¿No es esto automatización? Lo es y no lo es.

Para muchos, la automatización comprende prácticamente todo adelanto tecnológico desde que el hombre creó herramientas por primera vez. Para otros, sólo se refiere a las formas más adelantadas y relativamente recientes. Todo depende del punto de vista de cada uno.

Tal vez la definición más simple es la siguiente: *"Automatización es el desplazamiento de cualquier trabajador, mediante el uso de maquinaria"*. Prácticamente, esto nos hace retroceder al invento de la rueda, porque ésta permitió al hombre sentarse y dejarse arrastrar, en vez de caminar.

Otra persona la llama *"una palabra nueva, inventada para describir un procedimiento muy antiguo... En realidad, la automatización es sólo una fase de nuestro constante progreso tecnológico"*.

Para definirla técnicamente, se podría decir que es *"la sustitución con sistemas mecánicos, hidráulicos, neumáticos, eléctricos y electrónicos de los órganos humanos de observación, decisión y esfuerzo, a fin de incrementar la productividad, controlar la calidad y reducir el costo"*. También esta definición abarca mucho.

En algunos casos, el ingeniero y el especialista limitarán el uso de la palabra automatización a una estructura fundamental que requiere realimentación, de tal modo que un mecanismo discierna y corrija, o informe sobre los errores o cambios, a medida que ocurren.

Como lo estudiaremos, automatización es todo eso. En su sentido más amplio, no es un concepto nuevo, sino solamente una palabra nueva. Puede incluir todo nuestro adelanto tecnológico; puede limitarse a su sentido más moderno de control de realimentación. En la más vasta de sus acepciones, es un conjunto de mecanismos para producir más artículos de calidad fija, a un costo reducido, en el que el hombre hace menos trabajo y las máquinas hacen la mayor parte. Prácticamente, toda nueva herramienta es un paso más hacia el mayor incremento de la automatización y, por lo tanto cae bajo esta definición.

I.2 AUTOMATIZACIÓN MODERNA

Actualmente, ciertos aspectos de la automatización son tan distintos de sus primitivas formas en concepto, especie y grado, que tenemos que usar la palabra "moderno" para distinguir esos nuevos aspectos. Aun así, la automatización moderna significa muchas cosas

distintas, y se aplica a diversas tareas en una gran variedad de formas:

1) En un extremo de la automatización moderna se encuentran los mecanismos que trasladan automáticamente objetos materiales de un lugar a otro, que cambian de forma esos objetos a medida que avanzan, que se guían y mantienen por sí mismos, y que corrigen su propio trabajo. Su función consiste en producir objetos físicos.

2) En el otro extremo del campo, hay mecanismos que ordinariamente se llaman computadoras. Estas ejecutan, con gran rapidez, tareas lógicas y de toma de decisiones, ya sean rutinarias o complejas. Trabajan sobre valores intangibles. El hombre les da instrucciones sobre las tareas que deben llevar a cabo, y proceden con cifras, para analizar e interpretar datos complejos.

3) Aunque esas dos divisiones de la automatización moderna están diametralmente separadas, hay una área intermedia, que tiene igual o mayor importancia. En ella se encuentran los sistemas mixtos, en que las computadoras intervienen en las tareas de idear o controlar la producción de cosas materiales. En ella, se usan también las computadoras para preparar datos, analizarlos, suministrar la base de las decisiones, desempeñar labores rutinarias de oficina y facilitar las comunicaciones.

Los tres grupos reemplazan o mejoran los trabajos que pueden hacer los seres humanos.

Para aclarar todavía más las tres divisiones anteriores, tomemos un ejemplo de cada una. En el párrafo 1) encontramos la línea de producción de un bloque para motor de automóvil. En el párrafo 2) encontramos las computadoras que resuelven complicadas fórmulas matemáticas para proyectar y diseñar satélites que exploran el espacio. En el párrafo 3) hallamos las computadoras que dirigen el control de proceso de una planta industrial.

En pocas palabras, hay automatización en la maquinaria. La hay en el manejo de materiales y en la preparación de piezas; en el control de unas máquinas por otras, de modo que la producción se regule por sí misma. Hay automatización en la computadora que efectúa los análisis más científicos, o en la que elabora datos de todas clases.

El término automatización, por otro lado, se refiere a una gran variedad de sistemas y procesos que operan con muy poca o sin alguna intervención humana. En la mayoría de los sistemas de automatización, el control es ejecutado por el propio sistema, a través de equipos de control que censan los cambios en tales condiciones como temperatura, nivel de flujo y volumen; y después hacen ajustes para compensar los cambios.

Las aplicaciones de la automatización son demasiado extensas. De hecho, la mayoría de las operaciones industriales modernas son demasiado complejas como para ser manejadas manualmente, o con máquinas simples bajo el control manual.

I.3 PRINCIPIOS DE LA AUTOMATIZACIÓN

Un sistema automático ajusta sus operaciones en respuesta al cambio de condiciones externas, en tres pasos: medición, evaluación y control.

Medición. Para automatizar sistemas con el fin de que respondan al medio ambiente externo, debe ser posible medir las variables físicas de ese medio ambiente. Por lo tanto, si el nivel de flujo va a ser controlado, se debe hacer una medición para determinar cual es la cantidad de flujo. Si ocurre un procedimiento complejo en cadena, una medición o serie de mediciones debe ser hecha para definir el estado presente de la cadena. Estas mediciones alimentan al sistema con información conocida como de retroalimentación, porque la información es retroalimentada a la entrada del sistema y utilizada para realizar algún control sobre el. Por ejemplo, si el proceso es guiado por sí solo, la retroalimentación incluirá la localización del sistema, velocidad y aceleración.

Evaluación. La información medida es evaluada para determinar si la acción correctiva debe ser iniciada. Es por esto que si un reactor químico evalúa su presión interna y encuentra que esta fuera de rango, debe hacer una corrección de temperatura, cerrando la válvula de vapor y abriendo las de agua refrigerante. La función de evaluación también determina exactamente que tipo de acción correctiva es necesaria. En nuestro ejemplo, se determinaría el porcentaje de la válvula de vapor y el tiempo que deberá estar abierta a ese porcentaje.

Control. El último paso de la automatización es la acción resultante de las operaciones de medición y evaluación. Esto es, el reactor recibe una señal apropiada para abrir las válvulas y por lo tanto cambia el nivel de la presión. En muchos sistemas de automatización, estas operaciones pueden ser de difícil identificación. Un sistema puede involucrar la interacción de más de un ciclo de control, esto es, un ciclo en la dirección de la señal de la salida y de regreso a la entrada. Todos los sistemas, por lo tanto incluyen los pasos de medición, evaluación y control.

Esto se llama **Ciclo de Control** o **Circuito Cerrado** (Fig. I.1), porque ocurre dentro del mismo sistema. Este circuito cerrado entre la entrada y la salida, contrasta con los controles de **Circuito Abierto**, en los que un operador humano recibe información sobre los resultados de un procedimiento, la compara con el funcionamiento deseado y, si es necesario, hace ajustes en la entrada para lograr el resultado predeterminado.

Un ejemplo del ciclo de control que se usa a menudo es el sencillo circuito cerrado que se emplea para controlar la temperatura de las habitaciones. En este caso muy común, un mecanismo sensible (el termostato) mide una variable (la temperatura de la habitación). Mientras esa variable permanece constante, no sucede nada. Si cambia se envía automáticamente una señal al servomotor, que en este caso es el conmutador de arranque de la caldera o del circulador. Si se necesita menos, la interrumpe.

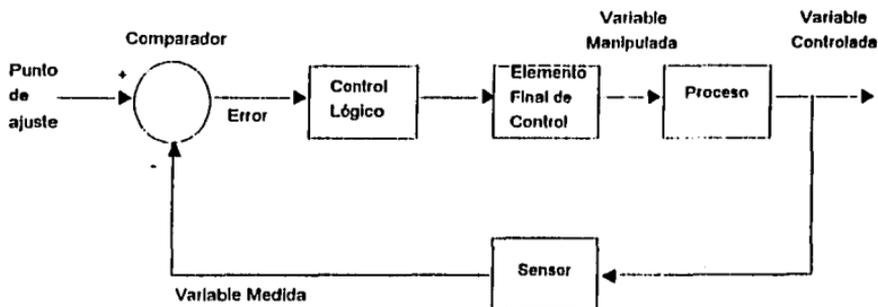


Figura I.1 Ciclo de Control

Así pues, el ciclo de control es un método automático de corrección o control. Es la base indispensable de la automatización moderna, ya que releva de toda responsabilidad al operador humano y hace el trabajo con mayor rapidez y precisión que el hombre.

I.4 APLICACIONES

La automatización es utilizada en numerosas industrias a través de todo el mundo. Algunas industrias han llegado a estar más automatizadas que otras, y algunos equipos no trabajan del todo sin instrumentos automatizados. En muchos casos, aplicaciones específicas de principios de automatización han sido líderes hacia nuevos campos.

La aplicación de los principios de automatización al control de operaciones continuas de manufactura es llamada Control de Procesos. Esta es utilizada extensamente en las industrias química y petroquímica, donde las temperaturas de gases y líquidos, flujo, presión, reacciones y muchas otras características deben ser controladas. Algunas plantas han llegado a estar tan automatizadas que la intervención humana es únicamente de utilidad para monitorear la operación de condiciones fuera de rutina.

Ahora bien, la automatización nos trae algo más que cambios en la forma de ejecutar el trabajo. Esto a su vez cambia la condición de los individuos: los que producen, distribuyen, presentan servicios y, naturalmente los que consumen, entre los cuales todos estamos incluidos. Todo cambio de técnica, todo invento, descubrimiento o producto que se perfecciona ha hecho lo mismo. Cada cambio ha trastornado alguna rutina y ha requerido ajustes en los aspectos sociales, económicos y políticos de la vida.

Cada invento ha tenido un efecto personal en todo ser humano. Para algunos, en verdad cada uno de esos cambios fue una tragedia. Algunos perdieron sus puestos; otros vieron hambrientos a sus hijos; algunos pensaron que toda una vida de trabajo había sido en vano; otros se sintieron infelices y frustrados; y todavía algunos otros se encontraron con nuevas situaciones, y con la necesidad de adquirir nuevas habilidades que apenas podían desarrollar. Sin embargo, en el transcurso de los años, las horas de trabajo han disminuido cada vez más.

Estos cambios en la vida del individuo, han producido ya mejores condiciones de trabajo, mayor seguridad en los empleos y mejores niveles de vida. No hay razón para suponer que este proceso vaya a detenerse o a hacerse más lento.

*Si crees que puedes vencer, puedes vencer.
Si no lo crees, te encontrarás para la victoria.*

William H. Kilmer

II TIPOS DE PROCESOS QUE SE PUEDEN CONTROLAR

II.1 TIPOS DE PROCESOS

Todo cambio que experimenta un sistema recibe el nombre de proceso. Ahora bien, estos procesos se pueden clasificar de acuerdo con diferentes criterios:

a) Atendiendo a la intervención del hombre. De todo el conjunto de procesos que se producen a nuestro alrededor, un grupo lo forman aquellos provocados por la naturaleza, sin la intervención del hombre. Son los llamados procesos naturales. Como ejemplo de esto tenemos la caída del agua en un río que se realiza desde un nivel superior a otro inferior.

En cambio, hay otros en que de una manera u otra se revela la mano del hombre que, valiéndose de su inteligencia, ha creado dispositivos que favorecen, alteran o invierten el sentido de los procesos naturales. Son los llamados procesos artificiales. Retomando el ejemplo anterior, el hombre puede invertir el sentido del proceso natural elevando el agua de un nivel inferior a otro superior mediante una bomba creada por él.

b) Atendiendo al tiempo. Los procesos se clasifican en continuos y discontinuos. Son continuos (Fig. II.1) cuando no existen interrupciones en el transcurso del tiempo; discontinuos (Fig. II.2) en el caso contrario.

Los primeros se dividen a su vez en permanentes y variables, según que las propiedades determinantes de las características del proceso en un punto cualquiera del sistema, permanezcan o no constantes en el tiempo. En un proceso de flujo continuo, las sustancias son introducidas continuamente en un recipiente o en una unidad química completa. Generalmente, la velocidad de carga se mantiene constante. El desarrollo de la reacción química tiene lugar durante el pasaje a través del recipiente, y el producto es descargado en forma continua. Cuando las sustancias se cargan y descargan en forma continua se usan instrumentos de control que mantienen uniforme el flujo a través del equipo.

Los segundos, procesos discontinuos, pueden sufrir interrupciones a intervalos iguales de tiempo, constituyendo los procesos cíclicos, o bien a intervalos que no siguen una regularidad definida. En procesos discontinuos, el tiempo no tiene ninguna influencia sobre el proceso. Es evidente, sin embargo que el tiempo es siempre un factor importante en los cálculos de ingeniería. Esto se debe a que el tiempo necesario para llevar a cabo una operación determina el tamaño del equipo o la cantidad de productos que deberán obtenerse con un recipiente de una capacidad dada. Cuando en un proceso discontinuo, haya o no reacción química, todas las sustancias son agregadas a la vez y luego de un tiempo son descargadas, el resultado no está influenciado por el lapso que fue necesario para llevar a cabo las distintas etapas del proceso.

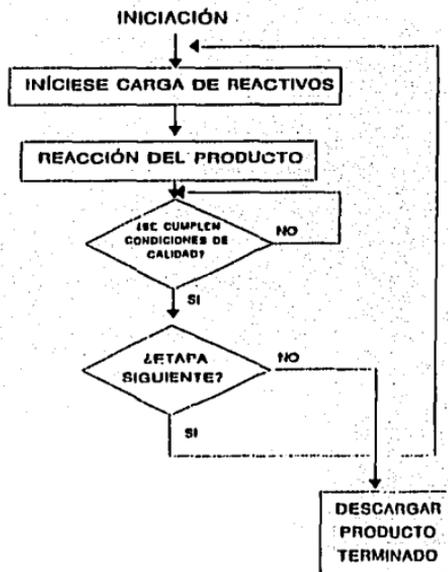


Figura II.1 Proceso Continuo

El control de un reactor por lotes consiste en cargar el reactor, controlar la temperatura del mismo para satisfacer algún criterio de procesamiento, apagar y vaciar el reactor. Para una reacción exotérmica, es probable que se necesite calor para obtener la temperatura de reacción deseada y luego se utiliza enfriamiento para mantener la temperatura de reacción adecuada.

El uso de instrumentación estándar para controlar un reactor por lotes requiere, por lo común, una atención minuciosa del operador. Por ejemplo, éste debe ajustar en forma manual las corrientes para cargar el reactor y luego ajustar los controles de temperatura para obtener el nivel de reacción deseado. Este último se logra incrementando la temperatura del reactor en forma escalonada muy por debajo del índice máximo.

Una técnica para reducir la atención que se requiere del operador, consiste en emplear un programa por lotes, un mecanismo que avanza automáticamente al lote a través de sus etapas de proceso, obedeciendo a un programa de tiempo preseleccionado. Para asegurar la

terminación completa de cada etapa de operación, las secuencias de tiempo se hacen normalmente un poco más prolongadas de lo necesario, o se añade una variable manual al programa, de tal forma que el operador mismo defina el tiempo de la etapa.

Por otro lado, cuando el proceso es regulado a través de computadora, se derivan ciertas ventajas. La cantidad de reactivos cargada se regula con mucha precisión para asegurar la mezcla adecuada. Los controles de temperatura se programan previamente para obtener un tiempo mínimo para sus lapsos transitorios. Si se cuenta con reguladores computarizados, el controlador se ajusta en forma automática para mantener una sintonía adecuada en todos los niveles de operación. En la figura II.2 se ilustra un ejemplo de diagrama de flujo de la acción del operador. Este diagrama de flujo puede servir también como guía para un programa de computadora que regule un reactor por lotes.

Ahora bien, dentro de la industria de procesos, se pueden distinguir los siguientes tipos de procesos, aclarando que es virtualmente imposible hacer notar una clara división entre dichos procesos:

1. Procesos continuos;
2. Procesos de manufactura;
3. Procesos por lotes o tipo batch.

1. Procesos continuos

En los procesos continuos, se obtiene una salida constante después de un arranque relativamente dificultoso, fase que sigue de un periodo de prueba que debe ser lo más largo posible.

El producto de salida debe satisfacer un cierto número de demandas cualitativas y cuantitativas. Conforme a estos requerimientos, se miden en línea un número de parámetros y los resultados son utilizados para regular continuamente el proceso y así llegar al resultado deseado.

2. Procesos de Manufactura

Los procesos de manufactura son caracterizados por el ensamble de máquinas de diversa naturaleza y por que la fabricación del producto se va desarrollando a través de una secuencia de pasos preparados.

En muchos casos estas máquinas se encuentran en un alto escenario de automatización y requieren muy poca intervención por parte de los operadores pero supervisión continua. Las máquinas se encuentran ligadas unas con otras por medio de sistemas de bandas transportadoras en donde las unidades de inspección están ubicadas en medio de estas máquinas.

Se esperan varios adelantos en este campo de actividad por el rápido avance de la robótica a través del cual las máquinas son habilitadas para realizar una amplia gama de tareas.

3. Procesos por Lotes o tipo Batch

Los procesos por lotes, al igual que los procesos de manufactura, están básicamente caracterizados por sus pasos relativamente simples pero donde cada uno requiere de un sistema que pueda procesar una gran cantidad de información. Esto se refiere particularmente a información que pueda cambiar el estado de la materia prima para garantizar que la demanda basada en la calidad de los pasos de la receta o del producto completamente procesado sea la misma en cada proceso. Así mismo, el control en la dosificación de la materia prima y en el almacén son factores importantes en el progreso de la producción y del control de calidad.

Es en almacén y el departamento de servicios de una planta industrial donde uno se encuentra con los problemas de los procesos por lotes. Una complicación extra aparece cuando la tubería que se encuentra en contacto directo con el producto debe ser limpiada y esterilizada. Es entonces cuando las reglas de seguridad y las mediciones deben ser de más alta calidad para asegurar una mejor separación entre el producto en proceso y los residuos del proceso anterior.

Un sistema de tuberías trabajando con un proceso a una temperatura del orden de un grado centígrado por ejemplo, es limpiado con sosa cáustica a una temperatura de 90°C y con vapor a una

temperatura de 100°C, para tratar de esterilizar al máximo el medio por el que van a circular las diferentes materias primas del proceso.

Ahora bien, el proceso puede ser adaptado durante cada paso, según sean las necesidades, por lo tanto el programa es sensible a intervención del sistema de control y/o del operador en turno que está relacionado con él.

En el caso de los procesos que ocupan un largo período de tiempo, es difícil guardar grandes cantidades de información ya que ésta proviene de muchas unidades, las cuales están operando en paralelo y donde diferentes cargas de materia prima son combinadas en los reactores para lograr una norma de calidad constante.

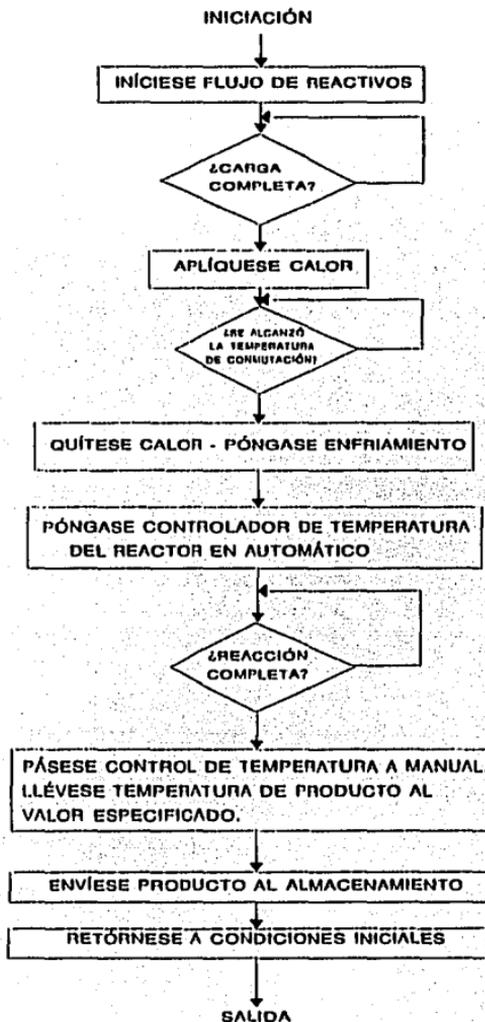


Figura II.2 Proceso por Lotes

Otro aspecto de los procesos por lotes es que frecuentemente las necesidades para cada proceso y cada producto son tan diferentes que es muy poco factible para el proveedor introducir un sistema completo al mercado. A pesar de esto, existe un incremento en la demanda por parte de la industria en el consumo de controladores programables y en la respuesta de los proveedores, con su casi interminable rango de aparatos ofreciendo, casi siempre posibilidades similares.

Es por esto, que en la industria se ha permitido la coexistencia de instrumentación para control de procesos (digital) y la medición y control de equipo (analógica), la unión entre ambos sistemas creó procesos con muy bajo riesgo de accidentes, por lo tanto la calidad y la velocidad en que se realiza el proceso se ve incrementada.

Se ve claramente que en el corto plazo la ganancia será mucho mayor que la inversión original y esto se debe a los sistemas digitales. Añadiendo módulos extras, estos sistemas digitales pueden procesar señales analógicas y han sido expandidos a través del área de proceso por medio de software que cuenta con algoritmos completos de regulación.

Actualmente existen diferentes distribuidores de sistemas de control y medición que ofrecen una amplia y progresiva gama de aparatos tales que permiten que las fábricas controlen sus procesos de principio a fin. Se esperan nuevos desarrollos que permitan que este período de la fabricación del producto sea lo más segura posible. Como un ejemplo podemos citar a los sensores; los cuales, en algunos casos no son lo suficientemente exactos para detectar condiciones de alarma e iniciar los cambios necesarios en el proceso y así lograr el resultado deseado. Tal es el caso de los procesos de fermentación, en los cuales es necesario tener una medición muy precisa de la temperatura y el nivel de fermentación, teniendo que ser esto de la manera más simple y eficiente posible. Por otro lado, se puede observar que la colección de datos se va incrementando con la finalidad de que el supervisor del proceso pueda tener estadísticas históricas de la forma en que se llevaron a cabo los procesos.

II.2 TIPOS DE CONTROL

En los inicios de la era industrial, el control de los procesos se llevó a cabo mediante tanteos basados en la intuición y en la experiencia acumulada. El operador era realmente el instrumento de control que juzgaba la marcha del proceso por medio del aspecto de la materia procesada y el tiempo transcurrido; de esta manera decidía, según su criterio, el mejor momento de finalizar la fabricación del producto. En esta decisión influía muchas veces la suerte, de tal modo que la calidad del producto variaba según el operador y la experiencia que se tuviera con respecto al proceso. Más tarde, el mercado exigió mayor calidad en las materias primas fabricadas, lo que condujo al desarrollo de teorías para explicar el funcionamiento del proceso, de las que derivaron estudios analíticos que a su vez permitieron

realizar el control de la mayor parte de las variables de interés en los procesos.

Dentro de la industria existen diferentes tipos de control, pero por el objetivo del presente escrito solamente describiremos los más comunes y que son controlados básicamente por una computadora, propiamente dicho.

II.2.1 Control Digital Directo (DDC)

En el Control Digital Directo (Fig. II.3), la computadora lleva a cabo todos los cálculos que son necesarios para generar directamente las señales que van a las válvulas. Este tipo de control realiza las siguientes funciones:

- a) Explora las variables de entrada analógicas o digitales;
- b) Las compara con los puntos de consigna e introduce la señal de error en el algoritmo de control correspondiente.
- c) Envía las señales de salida a las válvulas de control del proceso.
- d) Se disponen instrumentos analógicos en paralelo con la computadora en los puntos críticos y actúan como reserva en caso de fallo.

En el DDC, la computadora está enlazada con el proceso de tal forma que las señales procedentes de los transmisores de campo se reúnen en un punto terminal, llamado compuerta (gateway), y pasan a una unidad de filtrado y acondicionamiento donde son convertidas a señales digitales, para ser usadas en los cálculos posteriores del control.

Estas señales de entrada pueden tener varios orígenes:

- Señales de tensión procedentes de:
 - i) reóstatos,
 - ii) tacómetros,
 - iii) pH y conductividad.
- Señales de corriente procedentes de transmisores.
- Variaciones de resistencia de sondas que se caracterizan por una relación no lineal con relación a la temperatura.

A continuación se conectan a un multiplexor donde, de forma aleatoria o secuencial, pasan a la computadora.

La computadora permite comprobar cada señal de entrada y compararla entre límites prefijados para detectar si sale fuera de esas magnitudes y determinar así, a través de la lógica de la computadora y algoritmos de control como el PID, las causas de la desviación iniciando una alarma o bien ejecutando un cierto número de procedimientos para la corrección de la falla.

Por otro lado, el sistema DDC compara la señal enviada a la válvula de control con la de entrada y determina la aceptabilidad de la información para la acción de control. Si ésta no es aceptable se retiene la última posición de la válvula y el operador es prevenido, tomando la computadora una acción de emergencia. De este modo, los límites de operación del proceso pueden estrecharse con seguridad de manera que éste puede llevarse a un punto de operación crítico sin problemas.

El DDC permite una transferencia automático-manual sin perturbaciones y admite una fácil modificación de las acciones y de las configuraciones de los sistemas de control, lo cual es muy importante en la puesta en marcha de la planta. El DDC tiene la ventaja sobre los controladores convencionales de estar provisto de un calibrado automático que corresponde a las condiciones de operación instantánea. Es decir, la computadora ajusta la calibración de sus algoritmos de acuerdo con una función predeterminada de la variable medida o de una combinación de variables en lugar de requerir periódicamente la calibración individual de cada instrumento por un instrumentista o especialista en instrumentos, tal como ocurre en los instrumentos convencionales.

La computadora, propiamente dicho, admite la información de entrada del sistema proveniente de cintas o disquetes u otros tipos de soporte y almacena estos datos en una "memoria aritmética" y una sección de "control"; de esta última salen y entran los datos del proceso a través de la interfase.

La unidad de memoria almacena las instrucciones de programa y los datos empleados por la unidad central de tratamiento.

Entre los diversos tipos de memoria empleados en las computadoras de proceso se encuentran la memoria de núcleo magnético, apoyada por memorias de disco.

El tiempo de acceso en las memorias de disco magnético es relativamente largo ya que es necesario que el disco gire para que los cabezales se sitúen en el punto exacto de localización y, aunque la velocidad de giro sea elevada, del orden de varios miles de r.p.m., el tiempo de acceso es significativo. Por este motivo se utilizan generalmente como memorias auxiliares.

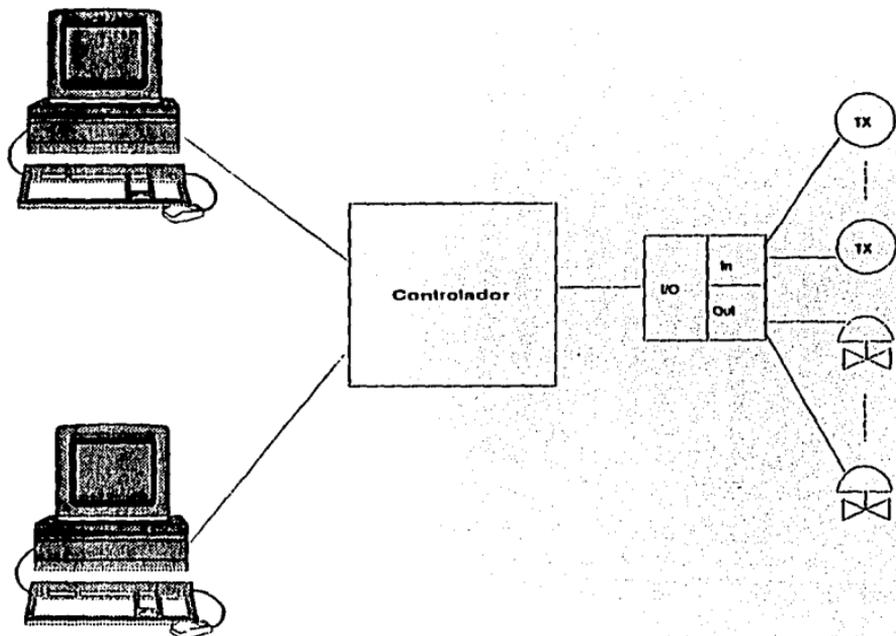


Figura II.3 Control Digital Directo

Entre las ventajas del sistema DDC figuran:

- Flexibilidad en el diseño del sistema de control, pudiéndose pasar fácilmente de una acción de control a otra, diseñar la ecuación de control que más convenga al proceso, y añadir cómodamente acciones de control en adelante o en cascada.
- Rendimiento del control al trabajar muy próximamente al punto óptimo de operación.
- Seguridad al poder comprobar cada variable entre unos límites prefijados.

II.2.2 Control Supervisor

A pesar de estas ventajas, el gran problema que presenta el DDC es, como todo sistema electrónico, los posibles fallos de sus componentes a pesar de los avances constantes en la tecnología de los circuitos integrados y la simplificación creciente lograda en el diseño de las computadoras.

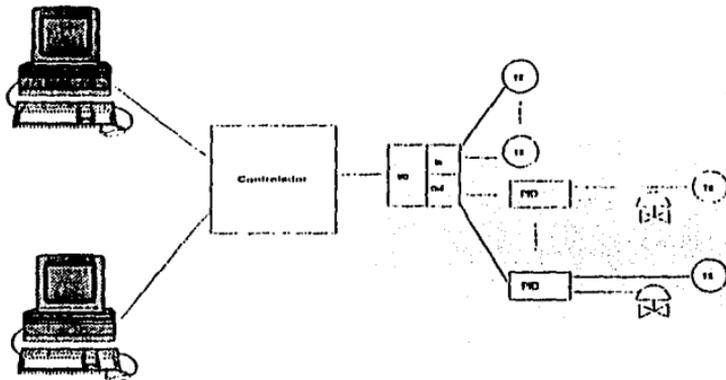


Figura II.4 Control Supervisor

Una protección parcial se consigue utilizando estaciones de transferencia automático-manual colocadas fuera de la computadora y disponiendo controladores analógicos adicionales en los lazos críticos. Sin embargo, para garantizar la ausencia total de fallos habría que utilizar más de una computadora interconectadas entre sí para que pudieran sustituirse mutuamente en su función.

Para alcanzar la máxima seguridad de funcionamiento y lograr la optimización idónea del proceso, la computadora podría determinar los puntos de consigna más convenientes en cada instante, aplicarlos a los lazos de control situados dentro de la propia computadora o bien en el exterior en controladores individuales. Este tipo de control recibe el nombre de "control de puntos de consigna" o SPC (Set Point Control), o bien Control Supervisor (Fig. II.4). La computadora calcula los puntos de consigna en paralelo con el bucle de control entre el transmisor y el controlador y los envía secuencialmente a cada instrumento. Si se presenta cualquier avería, el controlador regula la variable del proceso en el último punto de consigna que recibió de la computadora.

Dentro del control supervisor se usa el término SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) significando el uso de un ordenador huésped (host) que usa los datos transmitidos desde el campo y presenta los resultados al operador para que actúe como supervisor e

Control de Procesos por Lotes (Tipo Batch)

inicie alguna acción de control, y utiliza unidades remotas de transmisión situadas a largas distancias (kilómetros) del ordenador. Las unidades remotas de transmisión suelen ser "inteligentes", por lo menos en los lazos críticos.

Poco a poco, las funciones aportadas por los sistemas SCADA se han hecho semejantes al control distribuido, y la única diferencia reside en el tipo de circuito. SCADA transmite las señales a través de circuitos de baja velocidad y poco fiables para la integridad de los datos (líneas telefónicas y radio), mientras que el control distribuido lo hace mediante circuitos locales de alta velocidad y seguridad de transmisión.

II.2.3 Control Distribuido

En los años setenta, dentro de los esfuerzos de investigación dedicados a la resolución del problema del control de fábricas con gran número de lazos, y teniendo en cuenta el estado de la técnica de los microprocesadores y la característica "conservadora" de la industria, se llegó a las siguientes conclusiones generales:

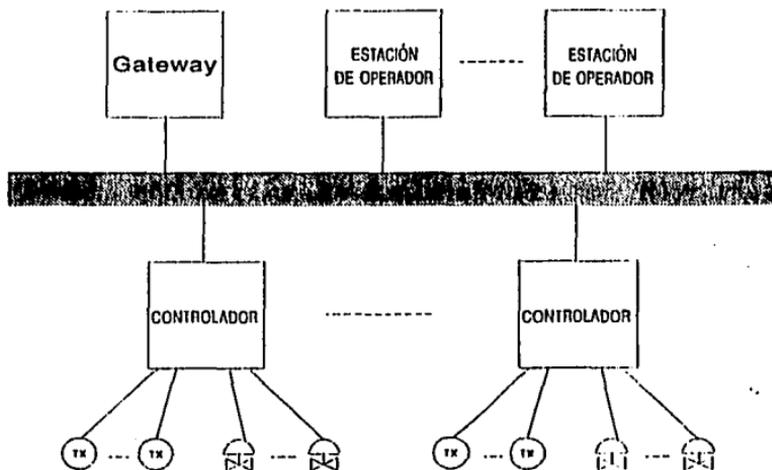


Figura II.5 Control Distribuido

1. Descartar el empleo de una única computadora (control DDC) por el serio inconveniente de la seguridad y sustituirlo por varios controladores digitales capaces de controlar individualmente un cierto

número de variables, para así "distribuir" el riesgo del control único.

2. Cada controlador digital debía ser "universal", es decir, disponer de algoritmos de control seleccionables por software, que permitieran resolver todas las situaciones de control y dieran así versatilidad al sistema.

3. La velocidad en la adquisición de los datos y sus salidas hacia las válvulas de control debía ser en "tiempo real", lo que obligaba a utilizar microprocesadores de 16 bits.

4. Para comunicar entre sí los transmisores electrónicos de campo, los controladores y las interfaces para la comunicación con el operador de la planta, se adoptó el empleo de una vía de comunicaciones, en forma de cable coaxial instalado en la planta, con un recorrido paralelo a los edificios y a la sala de control.

5. Para eliminar el espacio de panel requerido por el control clásico, se adoptó el uso de uno o varios monitores TRC, en los cuales, el operador, a través del teclado, debía examinar las variables de proceso, las características de control, las alarmas, etc., sin perturbar el control de la planta, y con la opción de cambiar cualesquiera características de control de las variables del proceso.

Como resultado de estos esfuerzos, el primer "control distribuido" para la industria apareció en noviembre de 1975 (TDC 2000 de Honeywell).

En esencia, la diferencia entre el control distribuido (Fig. II.5) y el control clásico puede compararse a la existencia entre la primera computadora, el ENIAC, que se configuraba cambiando cables, y la actual computadora personal donde los cables existen "electrónicamente" configurados por el programa escrito (software) que se ejecuta.

Ahora bien, el control distribuido está formado por diferentes componentes, estos son:

La computadora personal, que también se ha incorporado al control distribuido, permite la visualización de las señales de múltiples transmisores, el diagnóstico de cada lazo de transmisión, el acceso a los datos básicos de calibración y a los datos de configuración de los transmisores.

El control secuencial enlaza el control de regulación (modulante con posiciones que varían continuamente en la válvula de control) con el control lógico, el cual se encarga del arranque y paro de los motores. Por ejemplo, el arranque y paro de una caldera de vapor deben hacerse de modo secuencial para eliminar totalmente el riesgo de una explosión que ocurriría si, en el peor de los casos, entrara agua en

la caldera con el nivel muy bajo y con los tubos del serpentín al rojo. El control secuencial se realiza con un conjunto de instrucciones o sentencias, parecidas a programas de computadora, que establecen en el tiempo los puntos de ajuste de cada elemento para que tenga lugar la secuencia deseada. El lenguaje empleado es de alto nivel, parecido al PASCAL, y orientado al usuario del ordenador personal, por lo que es fácil de escribir y de interpretar.

En el control discontinuo (control batch) es usual automatizar la entrada de ingredientes, definiendo su naturaleza y cantidades en lo que se llama la fórmula o receta. Debido a que se fabrican muchos productos diferentes en la misma unidad de fabricación, es necesario que el equipo de control sea versátil para satisfacer la gran variedad de fórmulas que pueden presentarse. La práctica usual es disponer de un programa de la fórmula principal grabado en disco, y modificar ésta dinámicamente de acuerdo con los datos de la fórmula, las fases del proceso discontinuo y el tiempo estimado de ejecución de la operación.

La estación del operador proporciona la comunicación con todas las señales de la planta para el operador de proceso, el ingeniero de proceso y el técnico de mantenimiento. La presentación de la información a cada uno de ellos, se realiza mediante programas de operación. De este modo:

1. El operador de proceso ve en la pantalla (o pantallas) un gráfico o gráficos del proceso que le interesa, y puede manipular las variables deseadas, las alarmas, las curvas de tendencia, etc. Puede archivar datos históricos de la planta que crea interesantes, obtener copias en impresora de las tendencias, el estado de las alarmas, etc.

2. El ingeniero de proceso puede editar programas del proceso, construir las representaciones en la pantalla de partes del proceso, etc.

3. El técnico de mantenimiento puede fundamentalmente diagnosticar y resolver problemas en los elementos de control distribuido de la planta.

La computadora permite implementar los programas de aplicación de los usuarios, destinados a obtener información determinada de la planta, y procesarla con objeto de analizarla más adelante. El sistema se presta a optimizar variables, hacer cálculos especiales o complejos sobre balance de energía o de consumo de materias primas de la planta.

Por otro lado, la computadora puede comunicarse con otras computadoras de mayor capacidad para obtener información sobre el consumo de materias primas, sobre los factores que influyen en la producción y en su rendimiento, y sobre los datos analíticos que se utilizan en la optimización de la planta. Y, como es lógico, esta información actual obtenida del proceso es accesible a la dirección, que puede utilizarla para el control de costos de la planta.

El lenguaje utilizado suele ser de alto nivel, Fortran 77, Pascal y C. Se desarrollan programas que permiten utilizar el control distribuido de manera óptima para mejorar la productividad de la fábrica y minimizar los costos.

La tendencia de la computadora es a generar cada vez más información, la que debe ser transmitida rápidamente dentro de la planta, y a veces en tiempo real. Esta información es manejada por los llamados periféricos de la computadora. Estos periféricos deben trabajar a la misma velocidad que los sistemas basados en los procesadores 286 y 386. Entre ellos se encuentran memorias magnéticas o discos de 40, 80, 240 MBytes, memorias láser o CD's de 1 Gbyte, memorias ópticas de 40 Gbytes, impresoras rápidas con escritura de alta calidad, etc.

Las alarmas son importantes en el control de procesos. Existen alarmas de alto y bajo valor de la variable, alarmas de desviación entre el punto de consigna y la variable controlada, alarmas de tendencia que actúan si la variación de la variable excede de un valor prefijado, alarmas de estado de la señal de entrada o de salida, etc. Conviene evitar la instalación de un número excesivo de alarmas, ya que el operador se ve obligado a silenciarlas apretando el pulsador correspondiente y, además, le predisponen a no prestarles atención. Los casos en que la alarma actúa demasiadas veces durante el día son debidos a un mal diseño o a una condición del proceso que hay que corregir. Por ejemplo, una alarma de nivel de flotador situada en un tanque con agitador, en el cual no existan dispositivos de barrera contra las olas formadas en la superficie, estará actuando intermitentemente cuando el nivel alcance justamente al flotador. La solución a este caso y a otros parecidos es la llamada alarma "inteligente" que actúa siguiendo la lógica del circuito. En el ejemplo anterior, el sistema dispondría de un circuito lógico que, después de la primera alarma, comprobaría si el nivel bajaba y se separaba en un valor mínimo de la posición del flotador, y si éste no fuese el caso no actuaría por considerar que la situación no es una condición anormal.

El control distribuido tiene una seguridad mejorada con relación a los sistemas convencionales de control. Tal como se ha indicado, los transmisores disponen de un sistema de autocalibración y diagnóstico de averías que permite al personal de mantenimiento localizarlas y resolverlas rápidamente, en caso de que se produzcan. El sistema es redundante y puede considerarse como una "inteligencia distribuida" que, en forma parecida a la humana, limita las consecuencias de un fallo, manteniendo el control del sistema.

Desde el punto de vista de la fiabilidad del equipo, es decir la probabilidad de que el equipo continúe comportándose dentro de los límites especificados de error a lo largo de un tiempo determinado, tenemos que el número de horas/fallo de los elementos de un sistema de control distribuido es considerable y varía en régimen permanente y a la temperatura de 25° C desde 10,000 horas/fallo en los controladores

básicos hasta 220,000 horas/fallo en la vía de comunicaciones (cable coaxial), y este tiempo sigue creciendo con las nuevas técnicas de fabricación que se van incorporando a la industria.

Otro parámetro interesante es la llamada disponibilidad, es decir, la fracción de tiempo que el sistema es operable. Por ejemplo, una disponibilidad de 90% significa que el sistema trabaja el 90% del tiempo, mientras que el 10% restante está en reparación. Pues bien en los sistemas de control distribuido, la disponibilidad típica varía desde 99.2 hasta 99.9%, dependiendo de la bondad del equipo, de la existencia de piezas de recambio críticas y del mantenimiento. Por lo tanto, si el usuario dispone en la planta de dichas piezas, y ha contratado un buen mantenimiento, la seguridad de funcionamiento es clara.

Cabe pues afirmar que los sistemas de control distribuido se han consolidado en el mercado industrial como los sistemas ideales de control y, hoy en día sus ventajas son tan claras que, al estudiar la instrumentación y el control de una nueva fábrica o la reforma de una antigua, es inimaginable no considerarlos como posibles opciones de elección.

Los sistemas electrónicos, al usar la lógica binaria, presentan la ventaja de poder aplicarse y ser compatibles tanto para producción a gran escala como en la fabricación de un número pequeño de unidades (procesos de fabricación "batch" o por lotes).

El costo del equipo electrónico disminuye de forma continua, el software continúa su creciente desarrollo, y la presión económica que induce a la automatización se mantiene, por lo cual es de esperar que se ampliará la difusión de la automatización en los próximos años.

II.3 CONTROL DE PROCESOS

El control de procesos es un término general aplicado para describir la gran cantidad de métodos para regular los valores de las variables involucradas en la operación industrial. Estas variables son parámetros como presión de fluidos, temperatura, peso y nivel de flujo. De hecho, cualquier cantidad que requiera regulación en un proceso industrial puede ser tratada como variable para control de proceso.

Una parte integral de la Revolución Industrial y las innovaciones de manufactura posteriores causaron la necesidad de controlar, es decir, de regular automáticamente, muchos valores de diferentes parámetros de producción. Por ejemplo, para hacer plástico tal vez sea necesario mantener la temperatura de la reacción a una valor constante. Si el proceso no fuera controlado, la temperatura de la materia en proceso podría variar radicalmente y crear un producto de baja calidad o una situación más peligrosa. Para evitar esto se han desarrollado procedimientos que proveen dicha regulación. En un

principio se hacia tomando la lectura, evaluando y ajustando la variable manualmente. Más tarde se desarrollaron sistemas automáticos que pudieran medir, evaluar y ajustar sin la intervención directa del ser humano. La regulación automática de este tipo hace uso de la retroalimentación del valor de una variable para hacer los ajustes necesarios del proceso, tomando esa variable.

El Control de procesos surgió como un campo independiente de estudio, cuando se vio que los procedimientos utilizados para regular algunas variables era muy independiente de todo el proceso en el cual dicha variable ocurría. Desde este punto, el control de procesos se desarrollo rápidamente hasta llegar a ser una parte integral de la manufactura y de otras operaciones industriales. La alta tecnología utilizada hoy en día asegura una operación continua y tranquila de numerosas plantas, produciendo una gran diversidad de productos.

La manera como funciona la regulación dentro del control de procesos, al igual que la automatización, puede ser entendida en términos de tres operaciones: medición, evaluación y ajuste.

Medición. El funcionamiento de la medición dentro del control de procesos es realizada convirtiendo información de la variable, por ejemplo su valor numérico, a una señal proporcional de este valor para ser usado en la retroalimentación. Generalmente un intervalo de valores de la variable es convertida ya sea a forma de señal neumática (aire-presión), de 3 a 15 psi (libras por pulgada cuadrada) o a una señal de corriente eléctrica de 4 a 20 mA (miliamperios o milésimas de un amperio). Por lo tanto si una temperatura va a ser regulada en algún momento con un rango de 50 °C a 100 °C, entonces el valor de 50 °C puede ser representado por 4 mA y 100 °C por 20 mA, con los valores intermedios proporcionalmente distribuidos. La medición se realiza con el uso de transductores y un transmisor. El transductor convierte el cambio del valor de la variable a un movimiento mecánico proporcional, efecto eléctrico o valor neumático y el transmisor convierte la salida del transductor a una señal digital.

Evaluación. La función de evaluación es realizada por instrumentos electrónicos llamados controladores. El controlador compara el valor de la variable con el valor deseado, el cual es llamado punto de ajuste, y una señal de error es generada. Una evaluación de este error es realizada, y una señal de retroalimentación que reducirá el error contra cero será generada. La evaluación del error puede estar ejecutada por una examinación de cualquier combinación de tres características del error, así pues, son posibles tres tipos de control.

Uno es la actual magnitud del error relativo con el rango especificado arriba; éste es llamado control proporcional. Otro es la relación de la magnitud del error con el intervalo de tiempo sobre el cual el error ha ocurrido; éste es llamado control integral o de reseteo. Finalmente tenemos el rango en el cual el error es cambiado, dicho tipo de control es llamado derivativo. Históricamente, el primer

controlador instrumental fue el neumático; es decir, los tipos de control eran instalados manipulando la presión del aire en la tubería. Más tarde los métodos electrónicos fueron empleados utilizando amplificadores, circuitos integral y derivativo y muchas otras técnicas. En ambos casos el controlador era realmente una computadora analógica. Recientemente los avances en la tecnología de las computadoras digitales ha hecho, con el uso de esos sistemas de computadora, métodos más prácticos para realizar los diferentes tipos de control. En estos, los tipos de controlar son instalados por programas de computadora para la evaluación proporcional, derivativa e integral.

Ajuste. Para realizar la operación de ajuste automático, la señal de retroalimentación determinada por la evaluación es utilizada para afectar al propio proceso. Al equipo actual que logra esta operación se le denomina elemento final de control. Por ejemplo, para controlar el nivel de flujo, el elemento final de control es generalmente una válvula, y la señal de retroalimentación determina la correcta apertura de la válvula y la velocidad a la que debe llegar a dicha posición. El elemento final de control es por lo regular un equipo neumático o hidráulico (presión-líquido), por la fuerza significativa que pueden desarrollar, tal y como es requerida para efecto de cambio en el proceso.

El completo ensamble de los tres elementos (medición, evaluación y ajuste) constituye lo que es llamado un ciclo de control de proceso, donde la palabra ciclo nos da a entender la idea de retroalimentación de ajustes al proceso, siguiendo mediciones en el proceso. La mayoría de las operaciones industriales involucran muchas variables a ser reguladas y por lo tanto, muchos ciclos de control de proceso. Algunas veces las variables cíclicas interactúan con cada una para que los ajustes a una variable afecten a una segunda variable, y así sucesivamente. Todo el sistema de control de proceso es ensamblado por todos estos ciclos.

Desde la década de los setenta, los sistemas de control de procesos basados en el microprocesador han llegado a tener gran demanda. Dependiendo en las necesidades del usuario, dichos sistemas son un arreglo de microprocesadores para controlar desde una hasta cien variables. Además, estos microprocesadores están interconectados de tal manera que se puedan realizar ajustes complejos a través de una serie de variables basadas en información intercambiada entre ellos mismos.

El título no es algo a lo que obedecemos.

Es algo que nosotros creamos.

Lawrence J. Lovel

III PROCESOS POR LOTES (TIPO BATCH)

Los principios de los procesos por lotes o *procesos tipo batch* son tan viejos como la humanidad misma; un ejemplo muy común es la preparación de alimentos, ya que los procesos por lotes al igual que esto obedecen a un determinado número de pasos, el cual es la receta, para concluir con el producto. Igualmente, los procesos por lotes de naturaleza industrial tienen su propia historia. Sin embargo, el control automático es una técnica relativamente joven.

Los procesos continuos son más antiguos, por lo tanto tienen ya un control automático tradicional (Proporcional - Integrativo - Derivativo: PID); el cual se encuentra respaldado por teorías bien desarrolladas y metodologías establecidas.

Por otro lado, los procesos por lotes parecen tener cierta complejidad operacional que hace retroceder el desarrollo de sistemas formales de control. Por alguna razón los procesos por lotes no son una materia muy tocada en los cursos de control de las universidades.

III.1 ACCIONES DE CONTROL

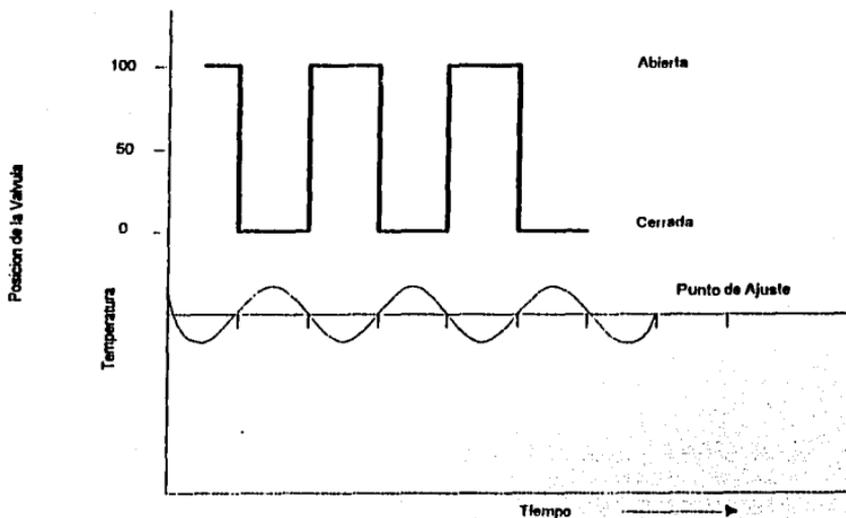


Figura III.1 Control Todo-Nada

En los sistemas industriales se emplea uno o una combinación de las siguientes acciones de control:

- De dos posiciones (todo-nada);
- Proporcional;
- Proporcional + integral;
- Proporcional + derivada;
- Proporcional + integral + derivada.

a) Control todo-nada

En la regulación todo-nada el elemento final de control se mueve rápidamente entre una de dos posiciones fijas a la otra, para un valor único de la variable controlada. En la figura III.1 se representa un control de este tipo, que se caracteriza por un ciclo continuo de variación de la variable controlada.

Este tipo de control se emplea usualmente con una banda diferencial o zona neutra en la que el elemento final de control permanece en su última posición para valores de la variable comprendidos dentro de la banda diferencial. Los ajustes de control se basan en variar el punto de ajuste y la gama diferencial.

El control todo-nada funciona satisfactoriamente si el proceso tiene una velocidad de reacción lenta y posee un tiempo de retardo mínimo. Se caracteriza porque las dos posiciones extremas de la válvula permiten una entrada y salida de energía al proceso ligeramente superior e inferior respectivamente a las necesidades de la operación normal.

Es evidente que la variable controlada oscila continuamente y que estas oscilaciones variarán en frecuencia y magnitud si se presentan cambios de carga en el proceso.

b) Control proporcional

En el sistema de posición proporcional, existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control (dentro de la banda proporcional). Es decir, la válvula se mueve el mismo valor por cada unidad de desviación.

En la figura III.2 puede verse la forma en que actúa un controlador proporcional cuyo punto de ajuste es 150°C y cuyo intervalo de actuación es de $100\text{--}200^{\circ}\text{C}$. Cuando la variable controlada está en 100°C o menos la válvula está totalmente abierta; a 200°C o más está totalmente cerrada y entre 100 y 200°C la posición de la válvula es proporcional al valor de la variable controlada. Por ejemplo, a 125°C está abierta en un 75%; a 150°C en un 50%.

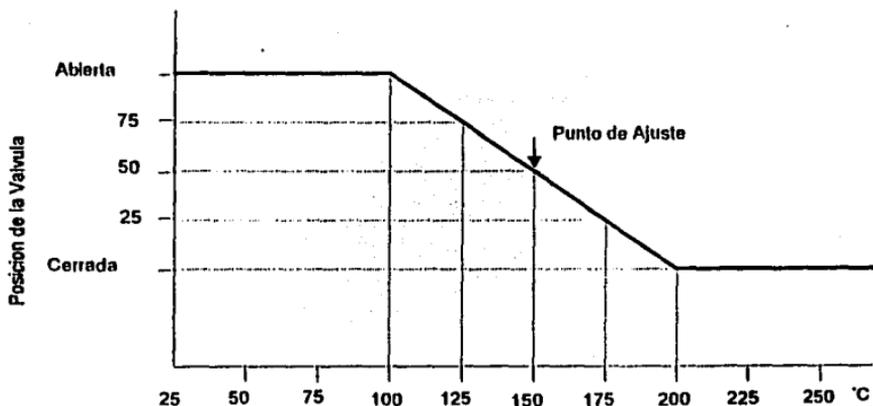


Figura III.2 Acción Proporcional

El valor de la válvula está dado por la siguiente ecuación, la cuál define al controlador proporcional:

$$Y = Y_0 + K_p(X - PA)$$

donde:

$$Y_0 = 50\% ; \quad K_p = \frac{100\%}{dp}$$

por lo tanto, la ecuación queda como sigue:

$$Y = 50\% + (X - PA) * \frac{100\%}{dp}$$

Ahora bien la ganancia del controlador proporcional es la relación entre la variación en la señal de salida y el error que la produce (diferencia entre la variable y el punto de ajuste).

Muchos controladores emplean en lugar de ganancia la denominada banda proporcional que es la inversa de la ganancia:

$$BP\% = \frac{100\%}{K}$$

y se puede definir como el porcentaje de variación de la variable controlada necesaria para provocar una carrera completa del elemento final de control. El valor de la banda proporcional de un instrumento particular, se expresa usualmente en tanto por ciento de su campo de medida total. Por ejemplo, si la escala del instrumento es 200°C, y se necesitan 50°C de cambio para provocar una carrera total de la válvula, el tanto por ciento de la banda proporcional es 50/200, o sea, 25%. En los controladores prácticos, la banda proporcional puede variar desde 1 hasta 500% aproximadamente.

El offset o error es una característica indeseable del control proporcional. En la figura III.2 se indican los regímenes de carga, temperatura y la posición de la válvula para una regulación de temperatura dentro de un reactor de un proceso químico no exotérmico. Inicialmente, el punto de consigna está en el valor deseado de 100°C. Al cabo de un tiempo se presenta un cambio de carga, originando, por ejemplo, un aumento en el consumo de agua caliente, por la apertura simultánea de un mayor número de válvulas de consumo. Nótese que la temperatura no vuelve al valor de consigna, sino que la misma se estabiliza a los 90°C. Es obvio que la temperatura final difiere de la primitiva, puesto que si así no fuera, por las características del control proporcional, la posición de la válvula sería la inicial, lo cual es imposible, ya que en esta posición se ha presentado la disminución de temperatura inicial y existiría el absurdo de mantener la misma temperatura de salida con la válvula de control en la misma posición dando el mismo paso de flujo de vapor, tanto para el consumo de agua caliente en el régimen inicial como para el aumento de este consumo.

La desviación puede eliminarse reajustando manualmente el punto de consigna. Hay que hacer notar que el control proporcional es un sistema de estabilización potente, capaz de ajuste y aplicación amplísima, pero tiene la característica indeseable del error de offset.

c) Control proporcional + integral

En el control integral, el elemento final se mueve de acuerdo con una función integral en el tiempo de la variable controlada.

Del mismo modo que la acción proporcional se definía por la banda proporcional o la ganancia, la acción integral viene definida por el denominado "tiempo de acción integral", que es el intervalo de tiempo en que, ante una señal de entrada en escalón, la parte de la señal de salida debida a la acción integral iguala a la parte debida a la acción proporcional.

La ecuación de un controlador proporcional más integral de tipo ideal es:

$$Y = Y_0 + K_p(X-PA) + K_i \int (X_i-PA) dt$$

en donde K_p y K_i toman los siguientes valores:

$$K_p = \frac{100\%}{d_p} ; K_i = \frac{100\%}{T_I \cdot d_p}$$

por lo tanto, y sustituyendo valores, la ecuación queda como sigue:

$$Y = 50\% + (X-PA) \frac{100\%}{d_p} + \frac{100\%}{T_I \cdot d_p} \sum (X_i-PA) t_c$$

La salida del controlador se compone de dos partes: la primera de ellas es proporcional al error y la segunda proporcional a la integral del error. En consecuencia, el controlador tiene una acción proporcional más integral, o acción proporcional más restauración, que es como normalmente se llama. La acción de restauración hace que la salida del controlador cambie en tanto exista un error. Incluso los errores pequeños proporcionan eventualmente la suficiente salida del controlador para hacer que el error se reduzca a cero, que es el propósito principal de la acción de restauración.

Para ilustrar mejor la acción del controlador proporcional más integral en el error de la señal, aparece ilustrada en la figura III.3 para un controlador ideal, en donde, T_i , denominado tiempo de restauración o tiempo integral, es el tiempo requerido para que la restauración de la salida del controlador se haga igual que la porción proporcional con un error constante.

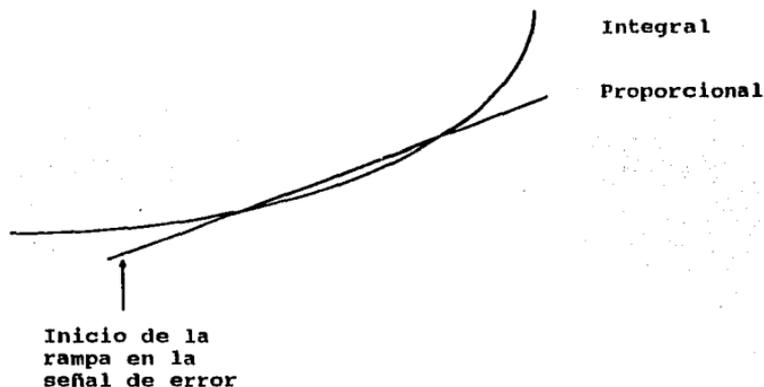


Figura III.3 Acción Proporcional-Integral

Hay dos métodos populares para designar la restauración en los controladores. La acción de restauración del controlador se puede calibrar en tiempo de restauración o integración, que usualmente se menciona como minutos por repetición, que son los minutos que deben transcurrir para repetir el cambio inicial de acción proporcional en la salida del controlador. En algunos modelos, la restauración se calibra en razón de restauración $1/T_i$, o sea, repeticiones por minuto.

d) Control proporcional + derivada o velocidad

El propósito primordial de la acción de velocidad o derivada consiste en acelerar la acción del control. Esto lo logra determinando por anticipado a dónde se dirige un proceso y aplicando la corrección necesaria para detener el cambio del error. Se "anticipa" midiendo la velocidad de cambio del error y aplicando una acción de control proporcional a dicha velocidad (o índice) de cambio. La acción derivada es de gran utilidad para los procesos de alto orden con una inercia importante, es decir, una respuesta de iniciación lenta a un cambio en la variable manipulada.

En la regulación derivada existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variable controlada y la posición del elemento final de control. Es decir, el movimiento de la válvula es proporcional a la velocidad de cambio de la variable, por ejemplo, la temperatura, cuanto más rápidamente varíe ésta, tanto más se moverá la válvula. En la figura III.4 se indica esta reacción y la componente proporcional.

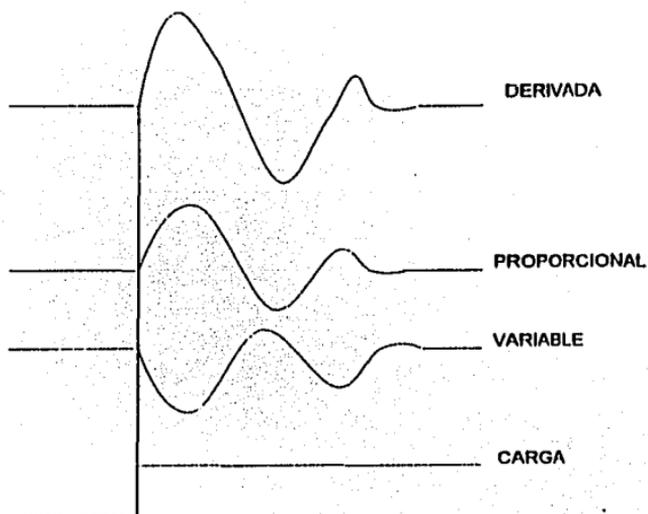


Figura III.4 Acción Derivada-Proporcional

El controlador proporcional más derivada ideal tiene la ecuación siguiente:

$$Y = Y_0 + K_p(X-PA) + K_d * d(X-PA)/dt$$

donde:

$$K_d = (100\% * \frac{TD}{dp})$$

por lo tanto, la ecuación queda como sigue:

$$Y = 50\% + (X-PA) * \frac{100\%}{dp} + \frac{100\% * TD}{dp} [\frac{(X_i-PA) - (X_{i-1}-PA)}{t_c}]$$

Por lo tanto, la salida del controlador es proporcional tanto a la magnitud del error como a su velocidad de cambio.

Las características de un controlador proporcional más derivada (PD) de tipo ideal se ilustran en la figura III.5, en

donde se supone que el error aumenta con una velocidad constante. t_c es el tiempo necesario para que la salida del controlador duplique el valor de la respuesta proporcional. En otras palabras, t_c es la base de tiempo sobre la que se calcula la acción derivada.

En el control PD, la acción de control de la velocidad se añade a la acción de control proporcional. La magnitud de la acción de velocidad depende de la ganancia proporcional, el tiempo nominal y la velocidad de cambio del error. Sin embargo, esto no contribuye a reducir la compensación.

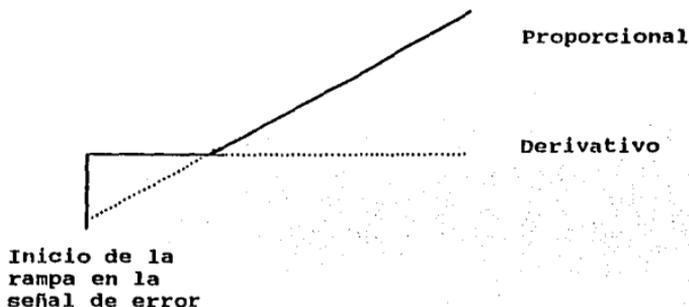


Figura III.5 Características Acción Proporcional-Derivada

La acción de velocidad o índice rara vez se utiliza en los sistemas de control con grandes cantidades de interferencia. Puesto que el ruido es una señal que varía con gran rapidez, la acción de velocidad que provoca es sustancial. En ciertas condiciones, el controlador puede incrementar la amplitud de pico a pico de la interferencia y, por lo tanto, ser indeseable. Esta posibilidad hace que muchos operadores de procesos eviten el uso de una acción de velocidad en lugares en que se podría utilizar con provecho, sacrificando parte del buen desarrollo del proceso.

El factor a señalar en la acción derivada es que al oponerse ésta a todas las variaciones, posee un gran efecto de estabilización, si bien no elimina el offset característico del sistema de posición proporcional. Por este motivo la regulación derivada, suele emplearse conjuntamente con la integral.

e) Proporcional + integral + derivada.

El controlador de tres modalidades combina las acciones de elementos proporcionales, integrales y de derivada en una sola unidad. El principal efecto de los diferentes elementos es el siguiente:

Proporcional (ganancia). En general, le da forma a la curva de respuestas; las ganancias superiores generan por lo común respuestas transitorias más rápidas, aunque también de mayor oscilación.

Integral (restauración). Elimina la compensación de estado uniforme.

Derivada (velocidad). Permite obtener ganancias proporcionales superiores en sistemas de más alto orden.

La ecuación precisa para un controlador PID depende del fabricante y el tipo de que se trate. La ecuación PID ideal está dada por:

$$Y = Y_0 + K_p(X - PA) + K_I \int (X - PA) dt + K_d \cdot d(X - PA) / dt$$

donde:

$$Y_0 = 50\% ; K_p = \frac{100\%}{dp} ; K_I = \frac{100\%}{TI \cdot dp} ; K_d = \frac{100\% \cdot TD}{dp}$$

por lo tanto, y sabiendo que :

PA = Punto de ajuste;

X = Variable de proceso;

Y = Posicionamiento de la válvula y

tc = Ciclo de ejecución;

la ecuación típica de un controlador PID, queda como sigue:

$$Y = 50\% + (X - PA) \frac{100\%}{dp} + \frac{100\% \sum (X_i - PA) tc}{TI \cdot dp} + \frac{100\% \cdot TD [(X_i - PA) - (X_{i-1} - PA)]}{dp \cdot tc}$$

Los controladores PID se emplean mucho y son "óptimos" para muchos criterios de diseño. Muchos de los métodos de diseño o ajuste no requieren que la ecuación del controlador tenga la forma

PID; sin embargo, el hecho de limitar las elecciones posibles al controlador PID hace casi siempre que el trabajo sea más directo.

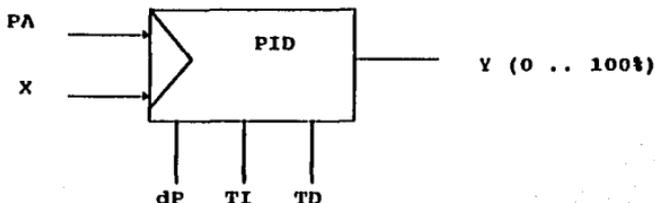


Figura III.6 Diagrama del Controlador PID

III.2 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Las tres acciones combinadas PID actúan sobre el elemento final de control en la forma señalada en la figura III.7.

Sus características esenciales ya estudiadas pueden resumirse así:

1. La acción proporcional cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al punto de ajuste.
2. La acción integral mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de ajuste.
3. La acción derivada corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada.

Considerando estos puntos, la selección del sistema de control es usualmente un compromiso entre la calidad del control que se desea y el costo del sistema de control. Es decir, debe ser suficiente para satisfacer la tolerancia requerida en el proceso, pero no debe incluir excesivos refinamientos que lo encarezcan.

PID; sin embargo, el hecho de limitar las elecciones posibles al controlador PID hace casi siempre que el trabajo sea más directo.

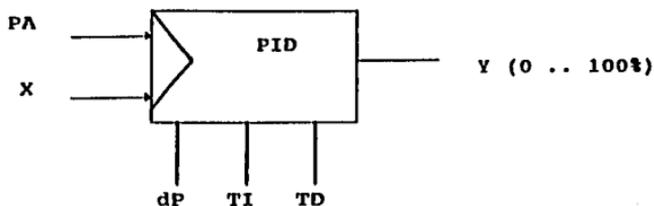


Figura III.6 Diagrama del Controlador PID

III.2 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Las tres acciones combinadas PID actúan sobre el elemento final de control en la forma señalada en la figura III.7.

Sus características esenciales ya estudiadas pueden resumirse así:

1. La acción proporcional cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al punto de ajuste.
2. La acción integral mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de ajuste.
3. La acción derivada corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada.

Considerando estos puntos, la selección del sistema de control es usualmente un compromiso entre la calidad del control que se desea y el costo del sistema de control. Es decir, debe ser suficiente para satisfacer la tolerancia requerida en el proceso, pero no debe incluir excesivos refinamientos que lo encarezcan.

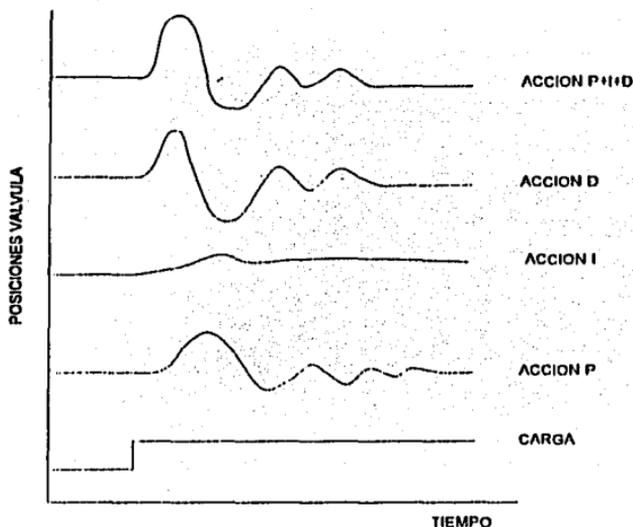


Figura III.7 Respuesta Sobre el Elemento Final de Control de las Acciones PID

Sin embargo, económicamente hay muy poca diferencia entre un controlador PI y uno PID, de modo que en el caso de estudiar procesos y sus perturbaciones que no sean bien conocidos puede ser más barato adquirir el controlador PID para tener así un potencial de mayor flexibilidad en el control del proceso. No obstante, los instrumentos actuales de tipo modular admiten fácilmente la adición de una o más acciones. Los controladores digitales incorporan las tres acciones, de modo que la elección de las mismas es técnica, para que el proceso esté bien controlado, y no económica.

III.3 DIMENSIONES DE LOS PROCESOS POR LOTES

Las computadoras utilizadas en los mismos procesos continuos, han sido la herramienta moderna aplicada al control de procesos por lotes. Esto se debe a que tienen la capacidad suficiente para realizar las funciones de secuencia lógica y operacional requeridas. En una estructura jerárquica de control, ayudan a resolver los problemas lógicos continuamente relacionados con producción por lotes. Hacen bien su trabajo para ayudar a alcanzar la más grande meta de la Manufactura Integrada por Computadora: respuesta flexible a los cambios en la demanda del producto.

La tendencia hacia la automatización de procesos por lotes, tales como la fermentación y la producción de químicos especializados, ha sido más lenta para abrirse camino que la automatización de procesos continuos. Sin embargo hoy en día la necesidad de procesos por lotes se esta incrementando. Esto se debe a la flexibilidad que ofrecen dichos procesos para conocer las demandas de los clientes para el proceso de fabricación de productos nuevos o modificados.

Las dificultades en el desarrollo y diseño de un sistema para control por lotes son de mayor magnitud que aquellos para aplicaciones de control continuo. Esto se puede justificar tomando en cuenta varias "dimensiones" del control por lotes, tales como:

- A. Estructura Jerárquica de la Planta
- B. Variedad en las Acciones de Control
- C. Operación Orientada a Procedimientos
- D. Interfase Humana
- E. Fabricación Simultánea de Diferentes Productos.

- A. Estructura Jerárquica de la Planta

Las plantas por lotes están formadas por unidades de proceso, que pueden estar agrupadas en líneas de producción. Ejemplos de esto son:

- Reactores
- Filtros
- Destilación
- Tanques recibidores

Un sistema de tuberías múltiple usado para transportar producto de una unidad de proceso a la siguiente y las estaciones de medición de producto, también pueden ser consideradas como unidades de proceso. Es decir, una unidad de proceso puede ser todo elemento o conjunto de elementos que sea parte de una etapa del proceso o lote final.

Los elementos de las unidades de proceso que pueden ser manipulados por el operador o el sistema de control para hacer productos por lotes pueden ser considerados como dispositivos. Ejemplos de esto son:

- Válvulas de venteo
- Válvulas internas
- Válvulas de vapor
- Agitadores
- Bombas

Ahora bien, si hablamos de jerarquización de procesos controlados por computadora, es decir, control automático de procesos, no debemos olvidar la aplicación del microprocesador, que juega un lugar de suma importancia, ya que ofrece la posibilidad de que el proceso corra automáticamente y con el más alto índice de exactitud.

Una característica de las aplicaciones del microprocesador es que se pueden controlar y regular un gran número de funciones utilizando una cantidad relativamente limitada de equipo.

B. Variedad en las Acciones de Control

En los procesos continuos, la mayoría de las funciones realizadas pueden ser traducidas en algoritmos bien definidos, tales como el control PID. Una estrategia de control automático puede ser realizada combinando estos algoritmos predefinidos y las condiciones de cada bloque pueden ser monitoreadas y manipuladas separadamente. Aunque se ha desarrollado bastante no se ha finalizado ningún tipo de algoritmo o bloque predefinido para los procesos por lotes.

El proceso por lotes depende fuertemente del control lógico, y la regulación, tomando en cuenta que dentro de estas dos divisiones se encuentran las funciones de cronometreo y de secuencia. Estas funciones de control tienen que ser aplicadas en todos y cada uno de los niveles de la planta.

C. Operación Orientada a Procedimientos

La secuencia a nivel de la planta esta determinada por procedimientos en lotes, esto determina las etapas necesarias para la fabricación del producto. En esta secuencia el control analógico y el control de alarmas están separados.

a) Control analógico.- En la mayoría de las plantas de procesos por lotes se requiere un ciclo de control analógico. Dicho ciclo es suficientemente crítico para ser considerado. Como ejemplo de esto tenemos el control de la temperatura, el cual es muy importante, especialmente en reacciones exotérmicas, ya que tiene gran influencia en la velocidad de la reacción.

Una temperatura de 10°C sobre el límite superior hace que el tiempo de la reacción sea dos veces más rápido. Como consecuencia sería necesario modificar la estructura de control de tal forma que la apertura o cierre de las válvulas tenga una relación más directa con el incremento de la temperatura del reactor.

b) Alarmas dinámicas.- En una planta de procesos por lotes es muy común que los límites de las alarmas vayan variando dependiendo de la secuencia que se este llevando en una cierta fase del proceso. Para ilustrar esto citaremos como ejemplo la válvula de venteo de un reactor:

Fase de carga: La válvula de venteo debe estar abierta, para permitir que el gas existente en el reactor se escape conforme el volumen ocupado por el producto se incrementa. Si la válvula se cierra por cualquier causa se debe activar una alarma. Sin embargo esta alarma no será crítica, será considerada como de precaución o alerta. Lo peor que puede suceder es que la bomba no funcione correctamente por tratar de trabajar contra la presión del reactor.

Fase de reacción: Ahora la válvula de venteo debe estar completamente cerrada, de otra manera se podrán escapar gases tóxicos o explosivos. Si la válvula se abre por cualquier razón, esto deberá ser causa de alarma. La alarma será considerada como crítica y posiblemente deberá iniciar una acción especial tal como un enfriamiento de emergencia del lote.

D. Interfase Hombre-Proceso

Una complicación más en los procesos por lotes es el deseo del cliente de que el proceso corra bajo ciertas reglas de seguridad, ya sea completamente automatizado, manualmente o posiblemente con una mezcla de estos dos extremos.

Como consecuencia, se deben planear una gran cantidad de modos de operación dentro de tres niveles de la planta. Como ejemplo se puede incluir lo siguiente:

Nivel de dispositivo

Un motor puede ser arrancado o detenido:

- Desde un arrancador local,
- Manualmente desde una consola central de operador,
- Automáticamente desde la secuencia lógica.

Nivel de unidad de proceso y nivel de planta

- Automático: Las diferentes etapas son iniciadas automáticamente desde una receta.
- Operador: Las diferentes etapas son iniciadas por el operador.

Además es necesario que se tengan diferentes modos de operación para permitir correcciones manuales tales como puentes (bypass), inserción de pasos que no fueron pensados en la

planeación original, o la finalización de un lote en una secuencia diferente a la inicialmente planeada.

E. Fabricación Simultánea de Diferentes Productos

La operación de una planta por lotes es más complicada que muchas de las plantas continuas, ya que se fabrican simultáneamente varios productos en paralelo. Para maximizar la utilización de equipo compartido, los productos fabricados en paralelo deben estar sincronizados de tal forma que se minimicen tiempos de espera y se reduzca la necesidad de limpieza interior. Otra complicación podría ser que los productos fabricados paralelamente sean diferentes y por lo tanto se requieren de diferentes procedimientos y recetas. También los procedimientos deben ser cambiados frecuentemente para ser competitivos en el mercado de productos especializados.

*El logro nunca es lo último, ni el error
irremediable, es la decisión lo que cuenta.*
Winston Churchill

IV. DESARROLLO DE UN PROCESO REAL

IV.1 CONTROL DISTRIBUIDO DE PROCESOS POR LOTES

La clásica respuesta hacia un control automático por lotes es el uso de computadoras de procesos, donde todo el control y las funciones del operador son manejadas por un **PAQUETE POR LOTES**. Los temores que se tienen al respecto son sobre el uso de algún tipo de tablero de respaldo o por la configuración de computadoras redundantes. Para incrementar la confiabilidad es necesario que algunas funciones se realicen a través de sistemas redundantes tales como controladores o PLC's.

El control distribuido de procesos por lotes intenta distribuir la lógica del control en módulos de control independientes, los cuales son asignados a unidades de proceso individuales. La distribución de las funciones de control ofrece las siguientes ventajas:

- Expansión más fácil del sistema.
- Mantenimiento más fácil.
- Alta disponibilidad.

- Contención de fallas.

Sin embargo es obvio que existen otros factores que se suman al ya complejo marco del control por lotes y que se necesitan principios muy cuidadosos de diseño para minimizar efectos negativos de estos.

Los sistemas actuales de control de procesos por lotes que forman parte de sistemas de control distribuido ofrecen las siguientes ventajas:

- Funciones de control analógico configurable; el cual provee control, cálculos, alarmas, etc.

- Condiciones múltiples de seguridad en caso de falla. Para procesos continuos sería normal apagar ya sea el equipo completo o solamente una parte de la planta cuando ocurra una alarma crítica analógica o digital. En procesos batch, sin embargo, es necesario que la condición de seguridad en caso de falla dependa de la condición actual del proceso. Para esto se pueden definir diferentes condiciones de respuesta a fallas, ligadas con cada tipo de proceso. La condición por la cuál el proceso es llevado a un caso de alarma crítica puede depender tanto en el tipo de alarma como en la operación física, que es ejecutada actualmente por la unidad de proceso.

- Interfase de operador configurable, diseñada para procesos batch, mostrando el estado actual de la unidad de proceso tales como reactores e indicando las acciones que actualmente están siendo ejecutadas.

- Reportes configurables del lote. Cada reporte del lote debe contener el proceso calculado, tiempo de producción y variables medidas del proceso.

- Funciones predefinidas y fáciles de usar o macros. Cada función hace una acción específica, tal como abrir una válvula e incluir un chequeo de alarma después de un tiempo especificado. Combinando las funciones el operador debe especificar la secuencia de las operaciones del proceso (fase lógica).

- La posibilidad de definir evaluaciones adicionales de procesos o programas de optimización.

Como se mencionó anteriormente, el sistema es adaptable a cambios tales como revisiones en los equipos de proceso. Las funciones están disponibles para que los operadores puedan modificar cualquier paso en línea, esto es mientras el proceso está corriendo.

El sistema está diseñado particularmente para cumplir los requerimientos de plantas que son de procesos múltiples, donde la

planta y el sistema de control pueden ser usados para la producción muchos tipos diferentes de productos.

IV.2 CRITERIO DE DISEÑO PARA UN SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO DE UN PROCESO POR LOTES

A continuación describiremos un criterio general de diseño para un sistema de control distribuido para procesos por lotes, sin entrar en el diseño actual con mucha profundidad.

- a. Dentro de un sistema de control distribuido, la siguiente modularidad es necesaria:

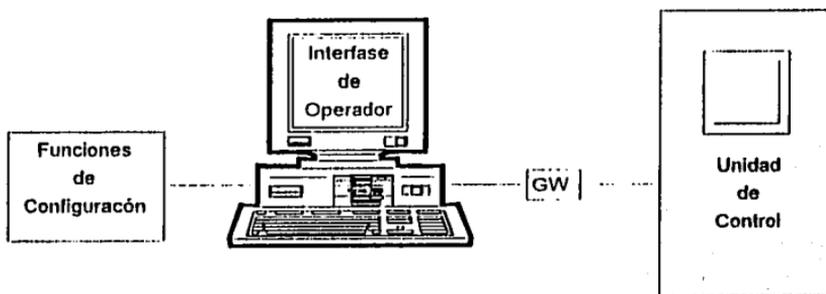


Figura IV.1 Modularidad del Control Distribuido

- Unidad de control. Controla secuencias lógicas, de regulación y de seguridad.
 - Módulo de comunicaciones (Gateway). Permite el enlace entre los controladores, las computadoras personales y la instrumentación de campo.
 - Interface de operador. Se encarga de presentar al operador los datos recopilados por el controlador.
 - Funciones de configuración. Especifican la secuencia del proceso, por ejemplo Carga, Dosificación, Regulación, Purga, etc.
- b. El software debe estar estructurado para minimizar la necesidad de comunicación. Esto se puede lograr en los términos siguientes:

- Detectar y manejar alarmas localmente, definidas en el programa del controlador.
 - Comunicación directa entre los módulos de control, sin la necesidad de manejo maestro por parte del operador.
- c. El sistema deberá proveer herramientas de control para permitir funciones tales como:
- Control Lógico y Regulación
 - Cronometreo
 - Secuencia
- a todos los niveles de la jerarquía de la planta.
- d. El sistema deberá respaldar modelado de la planta de proceso, permitiendo la definición entre equipo de proceso, esto puede ser en la siguiente forma jerárquica: equipo - unidad de proceso - línea de producción - planta.
- e. El sistema deberá proporcionar por lo menos dos niveles de configuración/modificación:
- Equipo de programación/configuración para dar interconexión segura al equipo, manejado esto por personal que maneje el sistema.
 - Configuración de procedimientos y lotes por personal familiarizado con los procesos, pero no forzosamente familiarizado con el sistema y detalles de equipo de la planta.
- f. El sistema debe dar una interfase hombre-proceso efectiva que permita al operador asignar, ver y manipular lotes, a través de funciones como:
- Pantallas generales de la planta, donde se puedan ver los puntos más importantes de control.
 - Gráficas de tendencia, en las que se muestre si la regulación ha sido óptima.
 - Visualización de unidades de proceso, tales como los reactores, o la instrumentación misma a detalle.
 - Tablas de lotes, clasificados como pendiente, en proceso y acabado.

- Información del estado del lote incluyendo cuanto lleva avanzado en el proceso.

IV.3 CONTROL DE PROCESOS EN UNA PLANTA QUÍMICA

Buckman Laboratories es una corporación de propiedad privada, fabricante de productos químicos especializados, que se estableció para descubrir, desarrollar, fabricar y vender en el país y en el exterior productos químicos propios para usos industriales.

La organización internacional Buckman fue fundada en 1945 contando únicamente con un hombre, una idea y una fábrica consistente en un reactor de 190 litros que funcionaba en el sótano de una pequeña casa. Se han ideado productos químicos con el fin de solucionar los problemas industriales en la producción de papel, cuero, pintura, azúcar, cemento, plásticos, textiles y cosméticos. El control de esta planta de procesos por lotes es muy extenso e incluye una gran diversidad de acciones para procesar, tales como:

- Control análogo para mantener el flujo, presión y temperatura a un cierto punto de ajuste.
- Control on/off para establecer seguridad en la carga de los reactores.
- Secuencias para guiar al equipo a una serie de acciones.
- Secuencias de alarma para asegurar que los procesos sean ejecutados con un alto grado de seguridad.

El control automático de la planta se pensó debido a un problema de presión alta que se tuvo con uno de los reactores, al estar efectuando una destilación de un reactor a otro; y como prevención al medio ambiente, para evitar expedir gases tóxicos a la atmósfera.

Aunque la primera idea era solamente monitorear la regulación de los reactores, se terminó con un sistema de control bastante amplio que incluye área de reactores, calderas, torres de enfriamiento y control de efluentes.

IV.4 COMPOSICIÓN GENERAL DEL EQUIPO DE CONTROL

El equipo descrito a continuación se compone de sensores y actuadores, estaciones de control y puesto de mando.

Sensores y actuadores son la instrumentación de campo, escogidos individualmente para cumplir con los siguientes requisitos fundamentales: exactitud, durabilidad y prueba de explosión.

Las estaciones de control constan medularmente del controlador programable R7044, diseñado y fabricado por Honeywell Inc. Este controlador, de una sola tarjeta electrónica, diseñado en torno al microprocesador de 16 bit Motorola MC-68000, se caracteriza por rapidez y precisión. Cualquier entrada puede usarse como analógica o como digital, indiferentemente, dependiendo de la configuración que le dé el programador.

El Puesto de Mando se compone esencialmente de una computadora PC, la cual consta con un procesador separado de comunicación distribuida DCP88 VX. Estas tarjetas electrónicas especiales son necesarias para la operación del Deltanet Excel Plus de Honeywell y todas las herramientas que este utiliza para una mejor confiabilidad de que el proceso de control se ejecutará con gran seguridad.

IV.4.1 Control de Reactores

Según el tipo de calentamiento aplicado (vapor o agua caliente), los reactores se clasifican en "Reactor de Alta Temperatura" (RAT) y "Reactor de Baja Temperatura" (RBT).

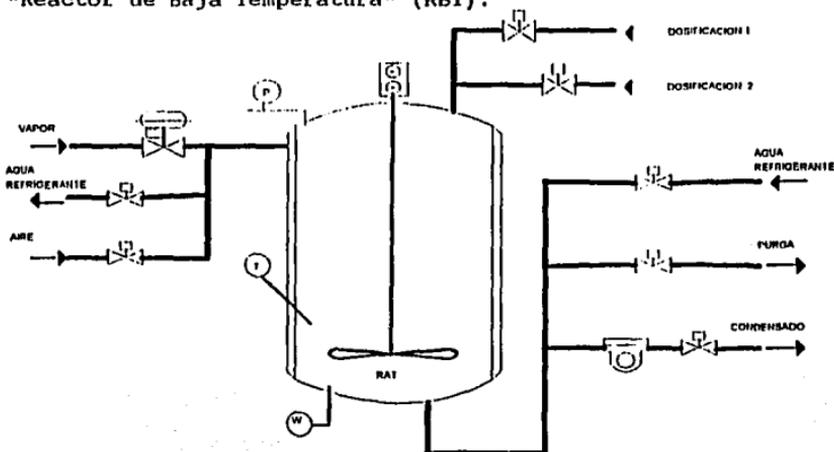


Figura IV.2 Reactor de Alta Temperatura (RAT)

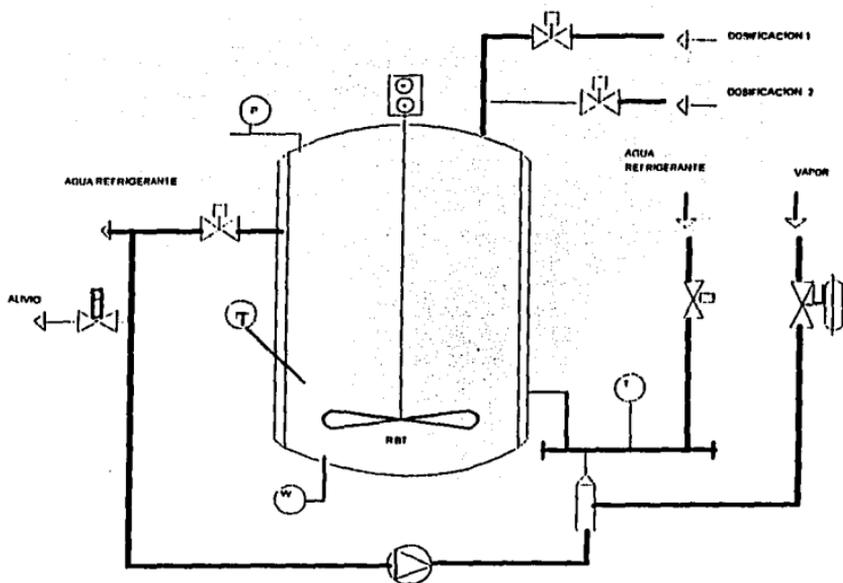


Figura IV.3 Reactor de Baja Temperatura (RBT)

La instrumentación de campo está concebida para un total de 3 unidades RAT y 3 unidades RBT.

Control Lógico. Desde el Puesto de Mando se arrancan y paran los procesos de reacción; con la orden de arranque (previamente cargado el reactor de manera manual) arranca también el agitador, comienza automáticamente la regulación de temperatura y, en el caso de las unidades RBT, arranca automáticamente la bomba de circulación.

En caso de presión o temperatura elevada en un reactor, la Estación de Control correspondiente ejecuta la siguiente secuencia de seguridad: cierra la válvula de calentamiento, abre las válvulas solenoides de enfriamiento, da alarma audible. Para reanudar la regulación normal, el operador del Puesto de Mando tiene que emitir el permiso por teclado.

El proceso normal se da por terminado por orden del Puesto de Mando (según los resultados de aprobación obtenidos por el departamento de control de calidad); al emitir el operador la orden de paro normal, la Estación correspondiente ejecuta la siguiente

secuencia: cierra la válvula de calentamiento, abre la válvula de enfriamiento hasta llegar el medio a la temperatura del agua refrigerante (o según ajuste), cierra la válvula de enfriamiento, para la bomba de circulación (en las unidades RBT) y el agitador.

Regulación. En las unidades RAT se regula la temperatura del medio reactivo, modulando en secuencia la válvula de enfriamiento y la válvula de calentamiento para mantener el punto de ajuste (PA). El valor regulado proviene del sensor de temperatura de reactor.

En las unidades RBT se regula la temperatura del medio reactivo en cascada con la temperatura del agua en circulación por la chaqueta de enfriamiento.

En ambos casos, utilizando regulación tipo Proporcional, dando opción a Proporcional-Integral (PI) cuando sea necesario. Dicha regulación se puede seleccionar desde el menú de funciones que se encuentra en cada uno de los reactores o puede correr automáticamente como secuencia de un proceso de fabricación de algún producto. La función generalmente opera en modo proporcional, ya que por la naturaleza de los productos químicos que se fabrican, que generalmente son procesos exotérmicos, el modo Proporcional-Integral nos da una respuesta demasiado lenta antes de estabilizarse el sistema y esto puede causar grandes daños, no solo al equipo, sino también al personal que se encuentra operándolo; el operador puede cambiar el punto de ajuste de la temperatura del medio reactivo por teclado durante la reacción.

Otra regulación que es muy importante para que los procesos se lleven a cabo de una forma segura y eficiente es la regulación de presión, la cual se lleva a cabo solo en algunos procesos, por lo tanto solamente se ejecutará automáticamente como secuencia del proceso.

En este tipo de regulación se seleccionó la configuración P, por la misma razón que en la regulación por temperatura.

La manera en que están distribuidos los programas de control y regulación se muestra en la figura IV.4.

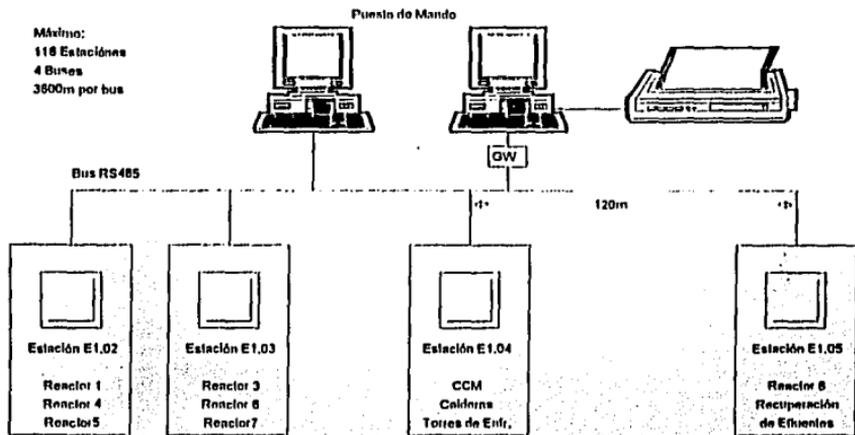


Figura IV.4 Distribución de Programas de Control

Como se puede ver, la estación de control E1.02 controla los reactores R1, R4 y R5, la estación E1.03 los reactores R3, R6 y R7, etc. Por otro lado, cada controlador tiene una capacidad de almacenar ocho programas, es por eso que los programas que controlan el proceso deben estar distribuidos en las estaciones de control. Para ilustrar esto podemos tomar el ejemplo de la alarma audible, es decir, si en alguno de los controladores existe causa de alarma, se activa un pseudopunto de salida relacionado con el punto físico de la estación de control E1.02, este pseudopunto se transmite a lo largo de par trenzado que interconecta a todos los controladores en serie. La estación E1.02 controla las alarmas, es decir que recibe la señal de alarma de los demás controladores ya que el punto físico, que en este caso es la bocina, se encuentra conectado en esta estación de control.

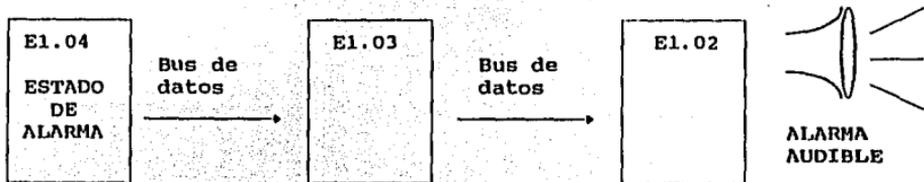


Figura IV.5 Transmisión de la Señal de Alarma

En la figura IV.6 se puede apreciar la manera en que están distribuidos los programas y qué es lo que controla cada uno éstos; tomamos como ejemplo algunos programas de la estación de control EI.03. En el Apéndice A se enlistan los programas de control para las unidades RAT y RBT, Torres de Enfriamiento, Calderas y Reactor R8 (Efluentes).

Programa 1	Programa 2	Programa 7	Programa 8
R3REG5	R3LOG5	ALMGEN	REDEL1
<ul style="list-style-type: none"> . Regulaciones R3 . Proceso DMASO . DOSIFICAR . CARGAR . PURGAR . ENFRIAR 	<ul style="list-style-type: none"> . Alarmas R3 . Fallas R3 . Paro por falla . Paro por alarma . Paro normal 	<ul style="list-style-type: none"> . Alarmas por estación . Alarma audible 	<ul style="list-style-type: none"> . Detectar falla de red . Parar motores . Arrancar equipos en emergencia
Ciclo: 6 seg	Ciclo: 3 seg	Ciclo: 2 seg	Ciclo: 3 seg

Figura IV.6 Contenido de los Programas de Control y Regulación

IV.4.2 Control de torres de Enfriamiento.

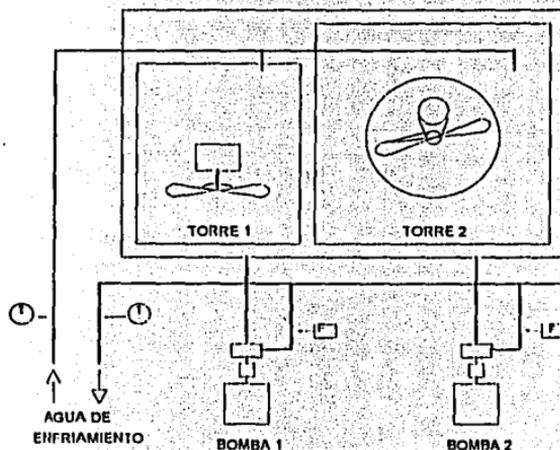


Figura IV.7 Torres de Enfriamiento

Las torres de enfriamiento arrancan y paran en secuencia de 2 pasos según la temperatura de salida del agua refrigerante.

Al fallar un ventilador arranca automáticamente el otro.

La bomba de alimentación arranca automáticamente al llegar el agua de la tina a nivel bajo y se detiene al llegar a nivel alto. Como medida de seguridad, hay detección de nivel máximo y nivel mínimo con alarma audible (falla de la bomba de alimentación).

Las bombas de agua refrigerante arrancan y paran por orden manual desde el Puesto de Mando.

Para propósito de reparación y mantenimiento, hay un selector "automático-0-manual" por cada torre (ventilador) y bomba de circulación.

Hay alarma audible en caso de falla de flujo de agua refrigerante.

IV.4.3 Control de Calderas

Las dos calderas de vapor están siempre listas para entrar en operación. El arranque automático de las calderas se efectúa en secuencia de dos pasos, según la presión del cabezal de vapor.

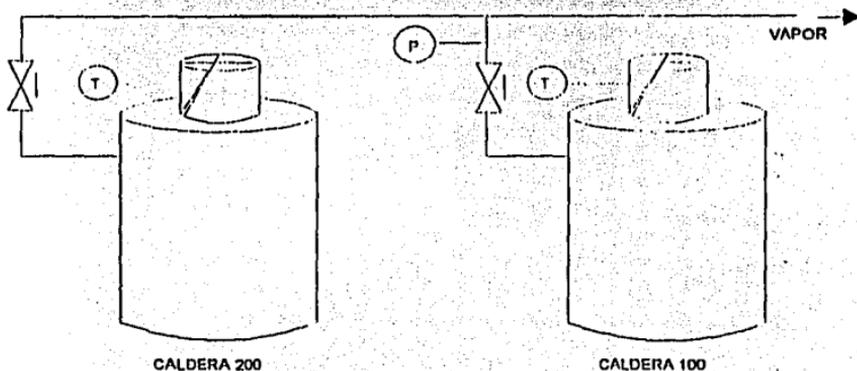


Figura IV.8 Calderas

Al fallar una caldera, entra automáticamente la otra.

Hay alarma audible por presión muy baja o muy alta de vapor en el cabezal de distribución; hay alarma impresa solamente en caso de temperatura muy alta en la chimenea de cada caldera.

En el Apéndice B, se muestran las características de los controladores, tanto de software como de hardware.

Hay alarma audible por presión muy baja o muy alta de vapor en el cabezal de distribución; hay alarma impresa solamente en caso de temperatura muy alta en la chimenea de cada caldera.

En el Apéndice B, se muestran las características de los controladores, tanto de software como de hardware.

*Un hombre no es lo que cree que es,
sino lo que cree, es.*

Mark R. Robinson

CONCLUSIONES

El sistema de control de Buckman Laboratories, ha estado en operación, por un año y se podría decir que ha cumplido con las expectativas. A pesar de los problemas de arranque, causados por falta de experiencia, ya que el equipo en el momento de ser instalado era el más avanzado, el control parece funcionar satisfactoriamente.

En la práctica, se encontró que para el tipo de procesos que se desarrollan, la mejor opción para controlar los reactores, evitando un incremento repentino en la temperatura interna o en la presión, es la acción proporcional.

Por otro lado, la opción de seleccionar operación completamente automática, semiautomática o manual fue de gran ayuda, ya que por la gran variedad de los procesos y la cantidad de variables que contiene cada uno, era imposible y poco costeable implementar un programa de control para cada uno de ellos. Ahora bien, aunque en todos los sistemas nuevos hay algún momento en el

que una inadecuación se presente, por ejemplo el convertir las básculas de analógicas a digitales, leyendo los valores en una pantalla digital, en lugar de un registrador gráfico, en esta conversión no se presentó más problema del que se esperaba.

El área en la que se presentaron una mayor cantidad de problemas fue en que era necesario cambiar de operación automática a semiautomática o manual.. La razón de esto es porque el operador no había practicado las acciones necesarias a tomar cuando el sistema no funcionaba completamente en automático o manual. La única manera de sobre llevar este problema es capacitando a los operadores a manejar el equipo en manual, para que no pierdan la práctica del control manual, en caso de emergencia. Un factor importante aquí es la calidad del operador, entre mayor sea, menor será el problema del cambio.

Otro punto que no podemos pasar por alto comentar es acerca del software de control con opciones administrativas, las cuales son enormemente funcionales cuando se tratan de medir los resultados de la producción después de la puesta en servicio del sistema de control, tales como el incremento de la producción, la reducción de tiempo perdido por causa de errores humanos y accidentes de trabajo.

Finalmente, solo nos resta decir que el sistema de control que se seleccionó ha incrementado el nivel de automatización a un grado óptimo de integración del control, monitoreo y secuencia. La posibilidad de reducir tiempos perdidos ha incrementado la productividad y la calidad de los productos con un retorno de la inversión inicial de más del 100%.

APÉNDICE A

Los programas que a continuación se muestran son los encargados de llevar a cabo la regulación y control lógico de las funciones con las que se configuró el sistema de control.

Tómese en cuenta que el lenguaje de programación es Pascal y que el número máximo de programas que se pueden instalar en cada controlador es de ocho, y la cantidad de bytes utilizados por programa depende de la capacidad de la memoria EPROM, por el momento los programas pueden ser tan largos y tan complejos como se desee, siempre y cuando no excedan los 512 Kbytes.

Los programas se muestran en orden numérico y no como están realmente cargados en los controladores y únicamente se muestran los programas base de un Reactor de Baja Temperatura, Reactor de Alta Temperatura, Control de Torres y Reactor de Efluentes R8.

En los lógicos de regulación se regula la temperatura interior del reactor cuando el pseudopunto "regulación" esta en ON; de lo contrario, se cierran las válvulas de vapor y condensado y se detiene la regulación.

Al pedir el operador dosificación, pseudopunto "dosificación", comienza una regulación en dos puntos de la temperatura interior, abriendo y cerrando la válvula de dosificación con una histeresis de +/- 1°C en torno al punto de ajuste. En este caso se cierra la válvula de vapor y de condensado y se abren inmediatamente las válvulas de agua refrigerante.

Al parar la dosificación, se cierra inmediatamente la válvula de dosificación; las válvulas de agua refrigerante quedan indefinidas.

```
%INCLUDE ddc.H
```

```
{=====
```

```
LOGICIAL DE CONTROL LOGICO RILOG  
PARA REACTOR DE BAJA TEMPERATURA R1  
-----
```

```
AUTOR: J.C.Altuzar      VERSION: 0.2
```

```
=====)
```

```
FUNCTION DILAC_1 (dale:boolean;limite:real):boolean;
```

```
VAR cont : real;
```

```
BEGIN
```

```
IF (cont <= 0.0) OR (cont > limite)
```

```
THEN BEGIN
```

```
    cont := limite;  
    DILAC_1 := FALSE;  
    END;
```

```
IF dale = TRUE
```

```
THEN BEGIN
```

```
    cont := cont - 3.0;
```

```
    IF cont <= 0.0
```

```
    THEN BEGIN
```

```
        DILAC_1 := TRUE;
```

```

        cont      := 0.0;
        END;

ELSE DILAC_1 := FALSE

END;

END;

FUNCTION DILAC_2 (avanza:boolean;limite1:real):boolean;
VAR  cont1 : real;
BEGIN
IF (cont1 <= 0.0) OR (cont1 > limite1)
THEN BEGIN
    cont1 := limite1;
    DILAC_2 := FALSE;
    END;

IF avanza = TRUE
THEN BEGIN
    cont1 := cont1 - 3.0;

    IF cont1 <= 0.0
    THEN BEGIN
        DILAC_2 := TRUE;
        cont1 := 0.0;
        END;

    ELSE DILAC_2 := FALSE

    END;

END;

END;

PROCEDURE LOGR1
{Entradas}

( bomba_auto           :digital_input;
  flujo                :digital_input;
  agitador_auto        :digital_input;

```



```
falla_bomba.value := (bomba_O_I.flags.Fail_to_Command) OR  
                    (bomba_auto.status.In_Alarm) OR  
                    (flujo.status.In_Alarm);
```

```
falla_reactor.value := (falla_agitador.value) OR  
                      (falla_bomba.value);
```

```
{CONDICION DE ALARMA}
```

```
alarma_reactor.value := (presion_int.status.In_Alarm);
```

```
{ARRANQUE DE REACTOR}
```

```
IF reactor_O_I.value AND NOT (falla_reactor.value  
                              OR alarma_reactor.value)
```

```
THEN BEGIN
```

```
    IF peso.value >= 400.0
```

```
    THEN agitador_O_I.value := TRUE;
```

```
    ELSE agitador_O_I.value := FALSE;
```

```
END;
```

```
{CARGAR}
```

```
IF CARGAR.value AND (reactor_O_I.value AND NOT  
                    (DOSIFICAR_1.value OR REGULAR.value  
                    OR falla_reactor.value OR alarma_reactor.value))
```

```
THEN BEGIN
```

```
    IF peso.value <= cargal.value
```

```
    THEN valvula_dos1.value := TRUE
```

```
    ELSE BEGIN
```

```
        valvula_dos1.value := FALSE;
```

```
        CARGAR.value := FALSE;
```

```
    END;
```

```
END;
```

{DOSIFICACION}

IF reactor_o_i.value AND NOT (CARGAR.value OR
REGULAR.value OR ENFRIAR.value
OR falla_reactor.value OR alarma_reactor.value)

THEN BEGIN

IF DOSIFICAR_1.value

THEN BEGIN

R1_BOMBA_DOS.value := TRUE;
valvulas_AR.value := TRUE;
bandera1 := TRUE;
IF peso.value >= carga1.value
THEN BEGIN
DOSIFICAR_1.value := FALSE;
R1_BOMBA_DOS.value := FALSE;
END;
END;

ELSE IF bandera1

THEN BEGIN

valvulas_AR.value := TRUE;
valvula_dos1.value := FALSE;
R1_BOMBA_DOS.value := FALSE;
retardo2 := DILAC_2(TRUE,144.0);
IF retardo2 = TRUE
THEN BEGIN
valvulas_AR.value := FALSE;
retardo2 := DILAC_2(FALSE,0.0);
bandera1 := FALSE;
END;
END;

END;

{ENFRIAMIENTO}

IF ENFRIAR.value AND NOT (REGULAR.value OR DOSIFICAR_1.value OR
CARGAR.value OR
falla_reactor.value OR alarma_reactor.value)

THEN BEGIN

IF temp_int.value >= (PA_temp_int.value + 1.0)
THEN valvulas_AR.value := TRUE
ELSE BEGIN

```
        valvulas_AR.value := FALSE;
        ENFRIAR.value := FALSE;
    END;
END;
```

{ESPERAR}

```
IF ESPERAR.value = TRUE
THEN BEGIN
    tiempo.value := tiempo.value - 0.05;
    IF tiempo.value <= 0.0
    THEN BEGIN
        tiempo.value := 0.0;
        retardol := DILAC_1(TRUE,18.0);

        IF retardol = TRUE
        THEN BEGIN
            ESPERAR.value := FALSE;
            retardol := DILAC_1(FALSE,0.0);
        END;
    END;
END;
```

{PARO NORMAL DE REACTOR}

```
IF reactor_O_I.value = FALSE
THEN BEGIN

    valvulas_AR.value := FALSE;
    valvula_vap.value := 0.0;
    valvula_dos1.value := FALSE;
    agitador_O_I.value := FALSE;
    REGULAR.value := FALSE;
    DOSIFICAR_1.value := FALSE;
    CARGAR.value := FALSE;

END;
```

{PARO POR ALARMA}

```
IF alarma_reactor.value

THEN BEGIN
    valvula_dos1.value := FALSE;
    valvula_vap.value := 0.0;
```

```

valvulas_AR.value      := TRUE;
REGULAR.value          := FALSE;
DOSIFICAR_1.value     := FALSE;
CARGAR.value           := FALSE;
END;

```

{PARO POR FALLA}

```
IF falla_agitador.value = TRUE
```

```

THEN BEGIN
  agitador_O_I.value := FALSE;
  DOSIFICAR_1.value  := FALSE;
END;

```

```
IF falla_bomba.value
```

```

THEN BEGIN
  bomba_O_I.value := FALSE;
  REGULAR.value   := FALSE;
END;

```

```
END;
```

```
CPROG 01,
```

```

E,      (el programa inicia en arranque frio)
01.001.0200000,(estacion E1.02)
4,      (numero de programa en la estacion)
3,      (ciclo de ejecucion, segundos)
084,    (canal de errores del logicial)
{entradas)
013,    (Bomba de circulacion en automatico, =A1-Q2 )
014,    (detector de flujo, =A1-S1 )
010,    (agitador en automatico, =A1-Q1)
002,    (presion interna, =A1-B2)
001,    (temperatura interna, =A1-B1 )
085,    (temperatura de agua refrigerante, =A1, SHARE )
015,    (peso de carga, =A1-B4 )
086,    (carga1, =A1 )
018,    (PA de temperatura interna )
{Parametros)
0.2,    (version del logicial)
{salidas)
011,    (bomba de circulacion O/I, =A1-K2 )
008,    (agitador O/I, =A1-K1)
004,    (valvula de vapor, =A1-Y1)
006,    (valvulas de agua refrigerante, =A1-V1)
003,    (valvula de dosificacion 1, =A1-V3)

```

```
079,      {falla de reactor, =A1}
087,      {falla de agitador, =A1}
110,      {falla de bomba, =A1}
080,      {alarma de reactor1, =A1}
081,      {reactor O/I, =A1}
076,      {dosificacion 1, =A1}
088,      {enfriar, =A1}
016,      {regular, =A1}
083,      {cargar, =A1}
089,      {esperar, =A1}
114,      {r1_bomba de dosificacion, =A1      ORG}
090;      {tiempo, =A1}
```

{CAE Customization: Tested. }

%INCLUDE ddc.H

{=====

LOGICIAL DE REGULACION RIREG
PARA REACTOR DE BAJA TEMPERATURA R1

AUTOR: J.C. Altuzar VERSION: 0.2

=====}

```
VAR  reg1_ram      :pid_work;  
     reg2_ram      :pid_work;  
     regAR_ram     :acdo_work;  
     regdos_ram    :acdo_work;  
     bomba_ram     :acdo_work;
```

PROCEDURE REGR1

{Entradas}

```
    ( temp_int      :analog_input;  
      temp_chag     :analog_input;  
      PA_temp_int   :analog_output;           {pseudo}  
      reg1_dP       :analog_output;           {pseudo}  
      reg2_dP       :analog_output;           {pseudo}  
      reg2_TI       :analog_output;           {pseudo}  
      PA2_min       :analog_output;           {pseudo}  
      PA2_max       :analog_output;           {pseudo}  
      dif_dos       :analog_output;           {pseudo}  
      PA_dosificacion1 :analog_output;       {pseudo}  
      alarma_reactor :digital_input;         {pseudo}  
      falla_reactor  :digital_input;         {pseudo}  
      int_onoff      :digital_input;         {pseudo}
```

{Parametros}

```
    version         :real;
```

{Salidas}

```

var REGULAR           :digital_input;           (pseudo)
var valvula_vap       :analog_output;
var valvulas_AR       :digital_output;
var DOSIFICAR1       :digital_input;           (pseudo)
var valvula_dos1     :digital_output;
var PA_temp_chaq      :analog_input;           (pseudo)
var bomba_circ        :digital_output;
var CARGAR            :digital_input;           (pseudo)
var ENFRIAR           :digital_input;           (pseudo)

```

```
EXTERNAL;
```

```
PROCEDURE REGR1;
```

```

VAR reg2_onoff        :boolean;
    Y1                 :real;
    Y3                 :real;
    Y4                 :real;
    Y5                 :real;
    lim_sup            :real;
    lim_inf            :real;

```

```
BEGIN
```

```
IF NOT (DOSIFICAR1.value OR ENFRIAR.value OR CARGAR.value
        OR alarma_reactor.value OR falla_reactor.value)
```

```
THEN BEGIN
```

```
IF REGULAR.value
```

```
THEN BEGIN
```

```
IF (1.0 * valvula_vap.residual_priority.value) >=
```

```
THEN int_onoff.value:= FALSE;
```

```

Y1:= PID( PA_temp_int.value,
          temp_int.value,
          reg1_dP.value,
          0.0,
          0.0,
          FALSE,
          reg1_ram );

```

```

PA_temp_chaq.value:=RATIO( Y1,
                           0.0,
                           100.0,

```

7.0

```
PA2_max.value,  
PA2_min.value);
```

```
Y3:= PID( PA_temp_chaq.value,  
temp_chaq.value,  
reg2_dP.value,  
reg2_TI.value,  
0.0,  
int_onoff.value,  
reg2_ram );
```

```
Y4:= SEQ( Y3,  
0.0,  
50.0 );
```

```
valvula_vap.value:=REV( Y4 );
```

```
{  
Y5:= SEQ( Y3,  
51.0,  
100.0 );
```

```
valvulas_AR.value:=ACDO( TRUE,  
Y5,  
1.0,  
15.0,  
regAR_ram ); }
```

```
{  
bomba_circ.value:= ACDO( TRUE,  
valvula_vap.value,  
0.0,  
5.0,  
bomba_ram ); }
```

```
TRUE;  
IF valvula_vap.value >= 5.0 THEN bomba_circ.value :=  
:=FALSE;  
IF valvula_vap.value <= 0.0 THEN bomba_circ.value
```

```
END;
```

```
ELSE BEGIN  
int_onoff.value := FALSE;  
valvula_vap.value := 0.0;  
bomba_circ.value := FALSE;  
END;
```

```
END;
```

```
IF NOT (REGULAR.value OR ENFRIAR.value OR CARGAR.value
OR alarma_reactor.value OR falla_reactor.value)
```

```
THEN BEGIN
```

```
IF DOSIFICAR1.value
```

```
THEN BEGIN
```

```
REGULAR.value := FALSE;
```

```
valvulas_AR.value := TRUE;
```

```
lim_sup:= PA_dosificacion1.value + dif_dos.value;
```

```
lim_inf:= PA_dosificacion1.value - dif_dos.value;
```

```
valvula_dos1.value:= NOT ACDO( TRUE,
temp_int.value,
lim_inf,
lim_sup,
regdos_ram );
```

```
END;
```

```
ELSE BEGIN
```

```
valvula_dos1.value := FALSE;
```

```
valvulas_AR.value := FALSE;
```

```
END;
```

```
END;
```

```
END;
```

```
CPRG 01,
```

```
E, (el programa inicia en arranque frio)
```

```
01.001.0200000, (estacion E1.03)
```

```
3, (numero de programa en la estacion)
```

```
6, (ciclo de ejecucion, segundos)
```

```
017, (canal de errores del logicial)
```

```
{entradas}
```

```
001, (temperatura interna, =A1-B1)
```

```
005, (temperatura de chaqueta, =A1-B3)
```

```
018, {PA de temperatura interna}
```

```
071, {regulador_1 de temp. dP}
```

```
072, {regulador_2 de temp. dP}
```

```
073, {regulador_2 de temp. TI}
```

```
074, (temp. de chaqueta, PA2_MIN)
```

```
075, (temp. de chaqueta, PA2_MAX)
```

```
077, {dosificacion, diferencial de temp.}
```

```
078, {PA de dosificacion 1}
```

```
080, {alarma_reactor}
```

```
079,      {falla_reactor}
122,      {int_onoff}
0.2,      {version del logicial}
{salidas}
016,      {regulacion, O/I}
004,      {valvula de vapor, =A1-Y1 }
006,      {valvulas de agua refrigerante, =A1-V1 }
076,      {dosificacion_1, O/I }
003,      {valvula de dosificacion 1, =A1-V3 }
019,      {PA de temperatura de chaqueta}
011,      {bomba de circulacion, O/I, =A6-K2 }
083,      {cargar, =A1}
088;      {enfriar, =A1}
```

INCLUDE ddc.H

=====

LOGICIAL DE CONTROL LOGICO R3LOG
PARA REACTOR DE ALTA TEMPERATURA R3

AUTOR: J.C. Altuzar VERSION: 0.3

=====)

FUNCTION DILAC_1 (dale:boolean;limite:real):boolean;

VAR cont : real;

BEGIN

IF (cont <= 0.0) OR (cont > limite)

THEN BEGIN

 cont := limite;
 DILAC_1 := FALSE;
 END;

IF dale = TRUE

THEN BEGIN

 cont := cont - 3.0;

 IF cont <= 0.0

 THEN BEGIN

 DILAC_1 := TRUE;
 cont := 0.0;
 END;

 ELSE DILAC_1 := FALSE

 END;

END;

FUNCTION DILAC_2 (avanza:boolean;limite1:real):boolean;

VAR cont1 : real;

```
BEGIN
IF (cont1 <= 0.0) OR (cont1 > limite1)
```

```
THEN BEGIN
    cont1 := limite1;
    DILAC_2 := FALSE;
    END;
```

```
IF avanza = TRUE
```

```
THEN BEGIN
    cont1 := cont1 - 3.0;

    IF cont1 <= 0.0

    THEN BEGIN
        DILAC_2 := TRUE;
        cont1 := 0.0;
        END;
```

```
ELSE DILAC_2 := FALSE
```

```
END;
```

```
END;
```

```
PROCEDURE LOGR3
```

```
{Entradas}
```

```
(
    Agitador_banda      :digital_input;
    Agitador_auto       :digital_input;
    presion_int         :analog_input;
    temp_int            :analog_input;
    temp_AR             :analog_input;
    peso                :analog_input;
    carga1              :analog_output;      (pseudo)
    carga2              :analog_output;      (pseudo)
    PA_temp_int         :analog_output;      (pseudo)
)
```

```
{Parametros}
```

```
    version            :real;
```

```
{Salidas}
```

```
var agitador_O_I      :digital_output;
```

Control de Procesos por Lotes (Tipo Batch)

```

var  valvula_vap           :analog_output;
var  valvula_cond         :digital_output;
var  valvulas_AR          :digital_output;
var  valvula_dos1         :digital_output;
var  valvula_dos2         :digital_output;
var  valvula_purga        :digital_output;
var  valvula_aire         :digital_output;
var  falla_reactor        :digital_input;           {pseudo}
var  alarma_reactor       :digital_input;           {pseudo}
var  reactor_O_I          :digital_input;           {pseudo}
var  PURGAR                :digital_input;           {pseudo}
var  DOSIFICAR1           :digital_input;           {pseudo}
var  DOSIFICAR2           :digital_input;           {pseudo}
var  ENFRIAR              :digital_input;           {pseudo}
var  REGULAR              :digital_input;           {pseudo}
var  CARGAR                :digital_input;           {pseudo}
var  ESPERAR              :digital_input;           {pseudo}
var  R3_BOMBA_DOS         :digital_input;           {pseudo}
var  tiempo                :analog_input;           {pseudo}

```

EXTERNAL;

PROCEDURE LOGR3;

```

VAR  regtemp_onoff        :boolean;
      retardo1             :boolean;
      retardo2             :boolean;
      retardo3             :boolean;
      bandera1             :boolean;
      bandera2             :boolean;

```

BEGIN

{CONDICION DE FALLA}

```

falla_reactor.value := (agitador_O_I.flags.Fail_to_Command) OR
                       (agitador_banda.status.In_Alarm) OR
                       (agitador_auto.status.In_Alarm);

```

{CONDICION DE ALARMA}

```

alarma_reactor.value := (presion_int.status.In_Alarm);

```

{ALARMA DE TEMPERATURA}

```
IF temp_int.status.In_Alarm
THEN BEGIN
  IF temp_int.value <= 65.0
  THEN BEGIN
    DOSIFICAR1.value := FALSE;
    DOSIFICAR2.value := FALSE;
    valvulas_AR.value := FALSE;
    alarma_reactor.value := TRUE;
  END;
  IF temp_int.value > 78.0
  THEN BEGIN
    DOSIFICAR1.value := FALSE;
    DOSIFICAR2.value := FALSE;
    valvulas_AR.value := TRUE;
    alarma_reactor.value := TRUE;
  END;
END;
```

{ARRANQUE DE REACTOR}

```
IF reactor_O_I.value = TRUE AND NOT (falla_reactor.value
OR alarma_reactor.value)
```

```
THEN BEGIN
```

```
  IF peso.value >= 500.0
```

```
  THEN agitador_O_I.value := TRUE;
```

```
  ELSE agitador_O_I.value := FALSE;
```

```
END;
```

{CARGAR}

```
IF CARGAR.value AND (reactor_O_I.value AND NOT
  (DOSIFICAR1.value OR DOSIFICAR2.value OR
REGULAR.value
```

```
  OR falla_reactor.value OR alarma_reactor.value
  OR PURGAR.value))
```

```
THEN BEGIN
```

```

IF peso.value <= cargal.value
THEN valvula_dos1.value := TRUE
ELSE BEGIN
    valvula_dos1.value := FALSE;
    CARGAR.value      := FALSE;
    END;

    END;

ELSE valvula_dos1.value := FALSE;

{DOSIFICACION}

IF DOSIFICAR1.value AND (reactor_O_I.value AND NOT (CARGAR.value OR
    REGULAR.value OR DOSIFICAR2.value OR ENFRIAR.value
    OR falla_reactor.value OR
    alarma_reactor.value
    OR PURGAR.value ))

THEN BEGIN

(    IF DOSIFICAR1.value

THEN BEGIN)
    R3_BOMBA_DOS.value := TRUE;
    DOSIFICAR2.value  := FALSE;
    valvulas_AR.value := TRUE;
    banderal         := TRUE;
    IF peso.value >= cargal.value
    THEN BEGIN
        DOSIFICAR1.value := FALSE;
        R3_BOMBA_DOS.value := FALSE;
        END;
    END;

    ELSE IF banderal

    THEN BEGIN
        valvulas_AR.value := TRUE;
        valvula_dos1.value := FALSE;
        R3_BOMBA_DOS.value := FALSE;
        retardo2 := DILAC_2(TRUE,144.0);
        IF retardo2
        THEN BEGIN
            valvulas_AR.value := FALSE;
            retardo2 := DILAC_2(FALSE,0.0);
            banderal := FALSE;
            END;

```

```

        END;
{      END;)}

IF DOSIFICAR2.value AND (reactor_O_I.value AND NOT (CARGAR.value OR
        REGULAR.value OR DOSIFICAR1.value OR ENFRIAR.value
        OR falla_reactor.value OR
alarma_reactor.value
        OR PURGAR.value))

{THEN      BEGIN

        IF DOSIFICAR2.value)

        THEN BEGIN
                R3_BOMBA_DOS.value := FALSE;
                DOSIFICAR1.value := FALSE;
                valvulas_AR.value := TRUE;
                bandera2 := TRUE;
                IF peso.value >= carga2.value
                THEN BEGIN
                        DOSIFICAR2.value := FALSE;
                        R3_BOMBA_DOS.value := FALSE;
                        END;
                END;

        ELSE      IF bandera2
                THEN BEGIN
                        valvulas_AR.value := TRUE;
                        valvula_dos2.value := FALSE;
                        R3_BOMBA_DOS.value := FALSE;
                        retardo2 := DILAC_2(TRUE,144.0);
                        IF retardo2
                                THEN BEGIN
                                        valvulas_AR.value := FALSE;
                                        retardo2 := DILAC_2(FALSE,0.0);
                                        bandera2 := FALSE;
                                        END;
                                END;
                END;

{      END;)}

{ENFRIAMIENTO}

IF ENFRIAR.value AND NOT (REGULAR.value OR DOSIFICAR1.value OR
        DOSIFICAR2.value OR CARGAR.value OR PURGAR.value
        OR falla_reactor.value OR
alarma_reactor.value )

```

THEN BEGIN

```
IF temp_int.value >= (PA_temp_int.value + 1.0)
THEN valvulas_AR.value := TRUE
ELSE BEGIN
  valvulas_AR.value := FALSE;
  ENFRIAR.value := FALSE;
  END;
END;
```

{ESPERAR}

```
IF ESPERAR.value = TRUE
THEN BEGIN
  tiempo.value := tiempo.value - 0.05;
  IF tiempo.value <= 0.0
  THEN BEGIN
    tiempo.value := 0.0;
    retardo1 := DILAC_1(TRUE,18.0);

    IF retardo1
    THEN BEGIN
      ESPERAR.value := FALSE;
      retardo1 := DILAC_1(FALSE,0.0);
    END;
  END;
END;
```

{PURGAR}

```
IF PURGAR.value AND NOT (REGULAR.value OR DOSIFICAR1.value OR
  DOSIFICAR2.value OR CARGAR.value OR ENFRIAR.value
  OR falla_reactor.value OR
  alarma_reactor.value)
THEN BEGIN
  REGULAR.value := FALSE;
  valvulas_AR.value := FALSE;
  valvula_purga.value := TRUE;
  valvula_aire.value := TRUE;
  retardo3 := DILAC_2(TRUE,144.0);

  IF retardo3
  THEN BEGIN
    PURGAR.value := FALSE;
```

```

        retardo3      := DILAC_2(FALSE,0.0);
        END;
    END;

ELSE BEGIN
    valvula_purga.value := FALSE;
    valvula_aire.value  := FALSE;
    END;

(PARO NORMAL DE REACTOR)

IF reactor_O_I.value = FALSE

THEN BEGIN

    valvulas_AR.value := FALSE;
    valvula_vap.value := 0.0;
    valvula_cond.value := FALSE;
    valvula_dos1.value := FALSE;
    valvula_dos2.value := FALSE;
    agitador_O_I.value := FALSE;
    REGULAR.value      := FALSE;
    DOSIFICAR1.value  := FALSE;
    DOSIFICAR2.value  := FALSE;
    CARGAR.value       := FALSE;

    END;

(PARO POR ALARMA)

IF alarma_reactor.value AND NOT (temp_int.status.In_Alarm)

THEN BEGIN
    valvula_dos1.value := FALSE;
    valvula_dos2.value := FALSE;
    valvula_vap.value  := 0.0;
    valvula_cond.value := FALSE;
    valvulas_AR.value  := TRUE;
    REGULAR.value      := FALSE;
    DOSIFICAR1.value  := FALSE;
    DOSIFICAR2.value  := FALSE;
    CARGAR.value       := FALSE;
    PURGAR.value       := FALSE;
    END;

(PARO POR FALLA)

```

IF falla_reactor.value

```
THEN BEGIN
  agitador_O_I.value := FALSE;
  DOSIFICAR1.value := FALSE;
  DOSIFICAR2.value := FALSE;
END;
```

END;

```
CPROG 01,
E,      (el programa inicia en arranque frio)
01.001.0300000, (estacion E1.03)
4,      (numero de programa en la estacion)
3,      (ciclo de ejecucion, segundos)
096,    (canal de errores del logicial)
{entradas}
013,    {Agitador, ruptura de banda, =A3-B1 }
012,    {agitador en automatico, =A3-Q1}
001,    {presion interna, =A3-B02}
002,    {temperatura interna, =A3-B1}
094,    {temperatura de agua refrigerante, =A3, SHARE }
014,    {peso , =A3-B3}
095,    {carga1, =A3}
115,    {carga2, =A3}
043,    {PA de temperatura interna, =A3}
{Parametros}
0.3,    (version del logicial)
{salidas}
010,    {agitador O/I, =A3-K1}
005,    {valvula de vapor, =A3-Y1}
007,    {valvula de condensado, A3-V3}
009,    {valvulas de agua refrigerante, =A3-V5}
003,    {valvula de dosificacion 1, =A-V6}
004,    {valvula de dosificacion 2, =A3-V7}
008,    {valvula de purga, =A3-V4}
006,    {valvula de aire, =A3-V2}
086,    {falla de reactor, =A3}
087,    {alarma de reactor3, =A3}
088,    {reactor O/I, =A3}
097,    {purgar, =A3}
081,    {dosificacion 1, =A3}
```

```
082,      {dosificacion 2, =A3}
098,      {enfriar, =A3}
080,      {regular, =A3}
090,      {cargar, =A3}
099,      {esperar, =A3}
119,      {r3_bomba de dosificacion, =A3      ORG}
100;
```

{CAE Customization: Tested. }

{CAE Customization: Tested. }
%INCLUDE ddc.H

{=====}

LOGICIAL DE REGULACION R3REG
PARA REACTOR DE ALTA TEMPERATURA R3

AUTOR: J.C. Altuzar VERSION: 0.2

{=====}

VAR regtemp_ram :pid_work;
 regdos_ram :acdo_work;
 condensado_ram :acdo_work;

PROCEDURE REGR3

{Entradas}

(temp_in	:analog_input;	
PA_temp_in	:analog_output;	{pseudo}
regtemp_dP	:analog_output;	{pseudo}
regtemp_TI	:analog_output;	{pseudo}
dif_dos	:analog_output;	{pseudo}
PA_dosificacion_1	:analog_output;	{pseudo}
PA_dosificacion_2	:analog_output;	{pseudo}
alarma_reactor	:digital_input;	{pseudo}
falla_reactor	:digital_input;	{pseudo}
int_onoff	:digital_input;	{pseudo}

{Parametros}

 version :real;

{Salidas}

var REGULAR :digital_input; {pseudo}
var valvula_vap :analog_output;

```

var  valvula_cond      :digital_output;
var  DOSIFICAR1       :digital_input;      (pseudo)
var  DOSIFICAR2       :digital_input;      (pseudo)
var  valvulas_AR      :digital_output;
var  PURGAR           :digital_input;      (pseudo)
var  CARGAR            :digital_input;      (pseudo)
var  ENFRIAR          :digital_input;      (pseudo)
var  valvula_dos1     :digital_output;
var  valvula_dos2     :digital_output);

```

EXTERNAL;

PROCEDURE REGR3;

```

VAR  regtemp_onoff    :boolean;
      lim_sup         :real;
      lim_inf         :real;
      Y1              :real;
      Y2              :real;
      Y3              :real;

```

BEGIN

```

IF NOT (DOSIFICAR1.value OR DOSIFICAR2.value OR ENFRIAR.value OR
PURGAR.value

```

```

      OR CARGAR.value OR alarma_reactor.value OR
falla_reactor.value)

```

THEN BEGIN

```

      IF REGULAR.value

```

```

          THEN BEGIN

```

```

              DOSIFICAR1.value := FALSE;
              DOSIFICAR2.value := FALSE;

```

```

              IF (1.0 * valvula_vap.residual_priority.value) >= 7.0
              THEN int_onoff.value := FALSE;

```

```

              Y1:= PID( PA_temp_in.value,
                        temp_in.value,
                        regtemp_dP.value,
                        regtemp_TI.value,
                        0.0,
                        int_onoff.value,
                        regtemp_ram );

```

```

        Y2:=      SEQ( Y1,
                    0.0,
                    50.0);

        valvula_vap.value:= REV( Y2 );

        IF valvula_vap.value >= 5.0 THEN valvula_cond.value :=
TRUE;
        IF valvula_vap.value <= 0.0 THEN valvula_cond.value :=
FALSE;

        {Y3:=      SEQ( Y1,
                    51.0,
                    100.0);

        valvula_cond.value:= ACDO( TRUE,
                    valvula_vap.value,
                    0.0,
                    5.0,
                    condensado_ram );      }

        END;

    ELSE BEGIN
        valvula_cond.value:= FALSE;
        valvula_vap.value := 0.0;
        int_onoff.value:=FALSE;
    END;

END;

IF NOT (REGULAR.value OR ENFRIAR.value OR CARGAR.value OR
PURGAR.value
        OR DOSIFICAR2.value OR alarma_reactor.value OR
falla_reactor.value)
THEN BEGIN
    IF DOSIFICAR1.value= TRUE
    THEN      BEGIN
        REGULAR.value:= FALSE;
        DOSIFICAR2.value := FALSE;

```

```

valvulas_AR.value := TRUE;
lim_sup:= PA_dosificacion_1.value + dif_dos.value;
lim_inf:= PA_dosificacion_1.value - dif_dos.value;

{
FALSE;
IF temp_in.value >= lim_sup THEN valvula_dos1.value :=
TRUE; }
IF temp_in.value <= lim_inf THEN valvula_dos1.value :=

valvula_dos1.value:= NOT ACDO( TRUE,
temp_in.value,
lim_inf,
lim_sup,
regdos_ram );

END;

ELSE BEGIN
valvula_dos1.value:= FALSE;
valvulas_AR.value := FALSE;
END;

END;

IF NOT (REGULAR.value OR ENFRIAR.value OR CARGAR.value OR
PURGAR.value
OR DOSIFICAR1.value OR alarma_reactor.value OR
falla_reactor.value)
THEN BEGIN

IF DOSIFICAR2.value= TRUE

THEN BEGIN

REGULAR.value := FALSE;
DOSIFICAR1.value := FALSE;

valvula_dos1.value := FALSE;
valvulas_AR.value := TRUE;
lim_sup:= PA_dosificacion_2.value + dif_dos.value;
lim_inf:= PA_dosificacion_2.value - dif_dos.value;

{
FALSE;
IF temp_in.value >= lim_sup THEN valvula_dos2.value :=
TRUE; }
IF temp_in.value <= lim_inf THEN valvula_dos2.value :=

```

```
valvula_dos2.value:= NOT ACDO( TRUE,  
                                temp_in.value,  
                                lim_inf,  
                                lim_sup,  
                                regdos_ram );
```

```
END;
```

```
ELSE BEGIN
```

```
valvula_dos2.value := FALSE;
```

```
valvulas_AR.value := FALSE;
```

```
END;
```

```
END;
```

```
END;
```

```
CPROG 01,
```

```
E,      (el programa inicia en arranque frio)
```

```
01.001.0300000, (estacion E1.03)
```

```
3,      (numero de programa en la estacion)
```

```
6,      (ciclo de ejecucion, segundos)
```

```
091,    (canal de errores del logicial)
```

```
{entradas}
```

```
002,    {temperatura interna, =A3-B1}
```

```
043,    {PA de temperatura interna}
```

```
092,    {regulador de temp., dP}
```

```
093,    {regulador de temp., TI}
```

```
085,    {dosificacion, diferencial de temp.}
```

```
083,    {dosificacion1, PA}
```

```
084,    {dosificacion2, PA}
```

```
087,    {alarma_reactor}
```

```
086,    {falla_reactor}
```

```
127,    {int_onoff}
```

```
{parametros}
```

```
0.2,    (version del logicial)
```

```
{salidas}
```

```
080,    {regulacion, O/I}
```

```
005,    {valvula de vapor, =A3-V1 }
```

```
007,    {valvula de condensado, =A3-V3 }
```

```
081,    {dosificacion1, O/I}
```

```
082,    {dosificacion2, O/I}
```

```
009,    {valvulas de agua refrigerante, =A3-V5 }
```

```
097,    {purgar, =A3}
```

```
090,    {cargar, =A3}
```

```
098,    {enfriar, =A3}
```

```
003,    {valvula de dosificacion1, =A3-V6 }
```

```
004;    {valvula de dosificacion2, =A3-V7 }
```

{CAE Customization: Tested.

 \$INCLUDE ddc.H

LOGICIAL DE CONTROL DE NIVEL
PARA TORRES DE ENFRIAMIENTO

AUTOR: J.C. Altuzar VERSION: 0.2

PROCEDURE NIVEL

(Entradas)

(nivel_supremo :digital_input;
 nivel_alto :digital_input;
 nivel_bajo :digital_input;
 nivel_infimo :digital_input;

(Parametros)

version :real;

(Salidas)

var valvula :digital_output;
var audible :digital_output);

EXTERNAL;

PROCEDURE NIVEL;

BEGIN

IF nivel_supremo.status.In_Alarm OR
 nivel_infimo.status.In_Alarm
THEN audible.value := TRUE;
ELSE audible.value := FALSE;

IF nivel_alto.value OR nivel_supremo.value THEN valvula.value
:= FALSE;

IF ((nivel_bajo.value = FALSE) OR (nivel_infimo.value =
FALSE))

THEN valvula.value := TRUE;

END;

CPROG 01,
E, (el logicial inicia en arranque frio)
01.001.0400000, (estacion E1.04)
7, (numero de logicial en la estacion)
4, (ciclo de ejecucion, segundos)
046, (canal de errores del logicial)
{entradas}
004, (nivel_supremo E1-B3)
005, (nivel_alto E1-B4)
006, (nivel_bajo E1-B5)
007, (nivel_infimo E1-B6)
{parametros}
0.2, (version del logicial)
{salidas}
045, (valvula de nivel E1-V1)
044; (alarma de servicios E1-A1)

{CAE Customization: Tested. }

!INCLUDE ddc.H

=====

LOGICIAL DE CONTROL LOGICO R8LOG
PARA REACTOR DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES R8

AUTOR: J.C. Altuzar VERSION: 0.2

=====)

PROCEDURE R8LOG

{Entradas}

```
(  presion_int           :analog_input;
   nivel_int            :analog_input;
   temp_int             :analog_input;
   presostato           :digital_input;
   bba_carga_auto       :digital_input;
   lim_inf              :analog_output;           (pseudo)
   falla_reactor8      :digital_input;           (pseudo)
   alarma_reactor8     :digital_input;           (pseudo)
```

{Parametros}

```
    version              :real;
```

{Salidas}

```
var bomba_circ          :digital_output;
var bomba_carga         :digital_output;
var bomba_sello         :digital_output;
var bomba_vacio         :digital_output;
var proceso_O_I        :digital_input;           (pseudo)
var CARGAR              :digital_input;           (pseudo)
var destilacion_1      :digital_input;           (pseudo)
var destilacion_2      :digital_input;           (pseudo)
var gradiente          :analog_input;           (pseudo)
var termino_1          :digital_input;           (pseudo)
var termino_2          :digital_input;           (pseudo)
var parar_proceso      :digital_input;           (pseudo)
```

Control de Procesos por Lotes (Tipo Batch)

```
var   banderin_1           :digital_input;           (pseudo)
var   tiempo               :analog_input);           (pseudo)
```

```
EXTERNAL;
```

```
PROCEDURE R8LOG;
```

```
BEGIN
```

```
{CONDICION DE FALLA}
```

```
falla_reactor8.value := (bomba_circ.flags.Fail_to_Command
                        OR bomba_sello.flags.Fail_to_Command
                        OR bomba_vacio.flags.Fail_to_Command);
```

```
{CONDICION DE ALARMA}
```

```
alarma_reactor8.value := (presion_int.status.In_Alarm
                        OR presostato.value);
```

```
{CARGAR}
```

```
IF CARGAR.value AND NOT (bba_carga_auto.status.In_Alarm)
```

```
THEN BEGIN
```

```
    bomba_carga.value := TRUE;
    IF nivel_int.value >= 300.0
    THEN BEGIN
        CARGAR.value := FALSE;
        bomba_carga.value := FALSE;
    END;
```

```
END;
```

```
ELSE bomba_carga.value := FALSE;
```

```
{ARRANQUE DE PROCESO}
```

```
IF proceso_o_i.value = TRUE AND NOT (alarma_reactor8.value OR
                                       falla_reactor8.value)
```

```
THEN BEGIN
```

```
    IF termino_1.value = FALSE
```

```

THEN BEGIN
    destilacion_1.value := TRUE;
    bomba_circ.value := TRUE;
    bomba_sello.value := TRUE;
    bomba_vacio.value := TRUE;
    destilacion_2.value := FALSE;
    termino_2.value := FALSE;
    IF tiempo.value >= 50.0
    THEN BEGIN
        IF gradiente.value <= 0.1
        THEN BEGIN
            destilacion_1.value := FALSE;
            termino_1.value := TRUE;
            bomba_circ.value := FALSE;
            bomba_sello.value := FALSE;
            bomba_vacio.value := FALSE;
        END;
    END;
END;

IF (destilacion_2.value) AND (termino_2.value= FALSE)
THEN BEGIN
    bomba_circ.value := TRUE;
    bomba_sello.value := TRUE;
    bomba_vacio.value := TRUE;
    IF (nivel_int.value <= lim_inf.value) OR (temp_int.value
>= 120.0)
    THEN BEGIN
        bomba_circ.value := FALSE;
        bomba_sello.value := FALSE;
        bomba_vacio.value := FALSE;
        destilacion_2.value := FALSE;
        termino_1.value:= FALSE;
        termino_2.value := TRUE;
        banderin_1.value:= FALSE;
        proceso_0_1.value:= FALSE;
    END;
END;

END;

ELSE BEGIN
    destilacion_1.value := FALSE;
    destilacion_2.value := FALSE;
    bomba_circ.value := FALSE;
    bomba_sello.value := FALSE;
    bomba_vacio.value := FALSE;

```

END;

(PARO POR ALARMA O FALLA)

IF alarma_reactor8.value OR falla_reactor8.value

THEN BEGIN

```
proceso_O_I.value := FALSE;
destilacion_1.value:= FALSE;
destilacion_2.value:= FALSE;
bomba_circ.value := FALSE;
bomba_sello.value := FALSE;
bomba_vacio.value := FALSE;
bomba_carga.value := FALSE;
END;
```

END;

CPROG 01,

```
E,          {el programa inicia en arranque frio}
01.001.050000,  {estacion E1.05}
2,          {numero de programa en la estacion}
3,          {ciclo de ejecucion, segundos}
045,        {canal de errores del logicial}
{entradas}
009,        {presion interna, =A8-B2}
007,        {nivel interno, =A8-B3}
008,        {temperatura interna, =A8-B1}
010,        {presostato de seguridad, =A8-S1}
025,        {bomba de carga A/M, =A8-Q4}
051,        {nivel interno, limite inferior =A8}
042,        {falla de reactor, =A8}
041,        {alarma del reactor, =A8}
{Parametros}
0.1,        {version del logicial}
{salidas}
002,        {bomba de circulacion O/I, =A8-K1 }
020,        {bomba de carga O/I, =A8-K4}
016,        {bomba de sello O/I, =A8-K2}
018,        {bomba de vacio O/I, =A8-K3}
001,        {proceso O/I, =A8}
040,        {cargar, =A8}
043,        {destilacion 1 =A8}
044,        {destilacion 2 =A8}
050,        {gradiente =A8}
046,        {termino 1 =A8}
047,        {termino 2 =A8}
```

```
052,      (paro de proceso, =A8)
057,      (banderin_1)
036;      (tiempo =A8)
```

APÉNDICE B

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXCEL PLUS

El sistema Excel Plus, también conocido como Micro Central, direcciona las necesidades de los diferentes controladores ubicados en cada edificio del sistema, el cual se intercomunica con el operador por medio de una computadora personal. Esta soporta una interfase gráfica, por medio de la cual se despliegan los datos que procesan los controladores. Una de las ventajas de esta configuración es que se conecta en forma de red, lo cual le permite ser expandido o conectarse a un sistema ya instalado, configurado por subsistemas de Micro Central.

La configuración basada en una compuerta (gateway) de canal sencillo permite la comunicación por medio de línea telefónica a otro controlador y a un grupo de hasta seis controladores.

El protocolo de comunicación que utiliza es de señal de paso (token-passing), lo cual permite que todos los controladores tengan un nivel igual de acceso hacia el bus. Todos los equipos tienen la capacidad de recuperación de error e inicialización de bus. En otros protocolos, la comunicación por el bus se detiene cuando uno de los

equipos se sale de línea. Con el protocolo par, la señal continúa mientras existan por lo menos dos controladores operando en el bus. Por lo tanto el sistema de comunicación continúa aún en condiciones severas, cuando existen múltiples procesadores distribuidos y estos se salen de línea, ya sea por fallas en la energía eléctrica o por otras circunstancias.

CARACTERÍSTICAS DEL CONTROLADOR (HARDWARE)

- | | |
|-----------------------|---|
| 1. Arquitectura: | Una sola tarjeta (Single Board Computer) |
| 2. CPU: | Motorola MC-68000, a 16 bit. |
| 3. Memoria: | 128 Kb RAM
256 Kb EPROM |
| 4. Puntos de Control: | 30 entradas analógicas o digitales
20 salidas digitales
10 salidas universales
4 contadores de pulsos. |
| 5. Comunicación: | 1 puerto RS485 (bus)
1 puerto RS232 (terminal) |
| 6. Convertidores: | 3 ADC de 16 bit |
| 7. Respaldo del RAM | Por condensador (para hasta 10 horas)
por batería (para varios meses) |

CARACTERÍSTICAS DEL CONTROLADOR (SOFTWARE)

1. Sistema Operativo: Multi-tareas, procesa simultáneamente hasta 8 programas, con diferentes ciclos de ejecución.
2. Funciones Especiales: Límites de advertencia, límites de alarma, simulación, vigilancia de circuitos, prioridades, horas de operación, supresión de ruido, inhibición de alarma.
3. Operadores de Control: PID (proporcional, integral, derivativo)
ADP (regulador adaptivo)
ACDO (analog controlled digital output)
DCAO (digitally controlled analog output)
RATIO (relación entre 2 valores)
TIMER (reloj)
DELAY (retardo)
SEQ (secuencia de actuadores)
REV (inversión de señal)
MAX (elegir máximo de varios valores)
MIN (elegir el mínimo de varios valores)
HOUR (leer la hora)
DATE (leer la fecha)
4. Operadores Matemáticos: +, -, *, /, LOG, EXP, SQRT, (()), =, <, >, <=, >=, <>, INT
5. Operadores Lógicos: AND, OR, NOT, IF-THEN, ELSE.
6. Lenguaje de Programación: Deltanet Pascal (compilador) véase ejemplo.
7. Puntos de Control: 250 (64 físicos, 186 pseudo).

BIBLIOGRAFÍA

Kuo, Benjamin C.
Automatic Control Systems.
Englewood Cliffs, N.J. Prentice Hall; 1987

Awad, Elias M.
Automatic Data Processing; Principles and Procedures.
Englewood Cliffs, N.J. Prentice Hall; 1973

Brooks, Frederick Philips.
Automatic Data Processing; System 360 edition.
New York; John Wiley, 1969

Sterens, Mary Elizabeth
Automatic Indexing: A State of the Art Report.
Washington, D.C.; National Bureau of Standards, 1965

R. Tanner, William.
Automatic Industrial Robots

Deaborn, Mich, 1979

Corbin, John Boyd
Developing Computer-Based Library Systems
Phoenix: Oryx Press, 1981

Sholer, Charles
Ind. Electronics and Robotics
McGraw Hill, New York, 1986

Coiffet, Philippe
Robot Technology
Englewood Cliffs, N.J.; Prentice Hall, 1983

Asada, Haruhiko, Youcef-Toomi, Kamal
Direct Drive Robots
MIT Press, Massachusetts, 1987

Kissel, Thomas E.
Understanding and Using Programmable Controllers
Prentice Hall, Nes Jersey, 1986

Rehg, James A.
Introduction to Robotics
Prentice Hall, New Jersey, 1985.

Houpis, Constantine H., Laymont, Gary B.
Digital Control Systems
McGraw Hill, Singapore, 1976.

D'Azzo, John J., Houpis, Constantine H.
Linear Control System Analysis and Design
3rdEd, McGraw Hill, New York, 1988.

Friedland, Bernard
Control System Design
McGraw Hill, Singapore, 1987.

Chestnut, Harold
Systems Engineering Tools
John Wiley & Sons, Inc., New York, 1965.

Meredith, Dale D., Wong, Kam W.; et al.
Design and Planning of Engineering Systems
2ndEd, Prentice Hall, New Jersey, 1985.

Ostroff, Jonathan
Temporal Logic for Real Time Systems
John Wiley & Sons, Inc., New York, 1989

Martínez del Campo, Manuel
Factores en el Proceso de Industrialización
Fondo de Cultura Económica, México, 1972.

Elsayed, Elsayed A.
Analysis and Control of Production Systems
McGraw Hill, New York, 1985.

Hopeman, Richard J.
Production Concepts Analysis Control
McGraw Hill, Ohio, 1971.

Creus, Antonio
Instrumentación Industrial
AlfaOmega Marcombo, Mexico, 1992.

Astrom, Karl G.; Wittenmark, Björn
Computer-Control Systems; Theory and Design
Prentice Hall, New Jersey, 1990.