



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN**

**“APUNTES DE APOYO PARA LA MATERIA DE
CONTROL DE PROCESO”**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
AREA: ELÉCTRICA – ELECTRÓNICA
P R E S E N T A :
PAOLA ARACELI MORALES OLVERA

ASESOR: ING. SERGIO GALICIA RANGEL

m346779



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

autorizo a la Direccion General de Radiodifusion
-ANAM a difundir en forma electrónica y impresa
convalida de mi firma las expresiones

Firma: Morales Olivera Paola Araceli

FECHA: 10 Junio 2005

FIRMA: 

AGRADECIMIENTOS

A mis Padres:

Félix Morales Mejía
Juanita Olvera Hernández

Gracias por su apoyo siempre desinteresado, impulsándome a dar lo mejor de mí, tengan la certeza de que su cariño, paciencia y confianza es lo que me ha llevado a lograr mis metas.

A mi hermana:

Ana Lilia Morales Olvera

Le agradezco su amistad, consejos y el invitarme constantemente a buscar la superación y el crecimiento profesional por medio de su ejemplo.

A mi cuñado:

Jaime Franco González,

Por su ayuda a lo largo de toda mi carrera y por ser en muchas ocasiones un maestro para mí.

A mi Asesor:

El Ing. Sergio Galicia Rangel

Mi gratitud, por su gran apoyo, paciencia, asesoría y motivación para que terminará mi trabajo de tesis.

APUNTES DE APOYO PARA LA MATERIA DE CONTROL DE PROCESOS

Objetivo del presente trabajo

Proporcionar al estudiante y al profesor una herramienta de consulta, que complemente lo visto en el aula; pues en ellos se encuentran desarrollados en su totalidad el temario de la materia con la evidente y necesaria opción de consultar la bibliografía indicada para ampliar las ideas y conocimientos.

Justificación

Resulta importante que los estudiantes que se encuentran casi por terminar su carrera tengan una idea más clara de lo que tendrán que enfrentar en casi todo trabajo profesional y con mayor razón si se dedican al área de control. Por esta razón se presentan aquí las notas de lo más significativo concerniente a la materia "Control de procesos" la cual se imparte como materia optativa del área Eléctrica y Electrónica en la carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Con la presentación de estos apuntes se pretende dar a los profesores una visión de los temas que abarca esta materia y también llegado el caso que pueda servirles como un apoyo para su exposición. Al mismo tiempo se busca dar al alumno una herramienta de consulta que complemente la información recibida en el aula a través de la exposición del profesor además de la investigación bibliográfica personal.

Pero sobre todo busca estar al alcance de todos los alumnos y maestros ya que si se revisa el temario de la materia Control de Procesos aprobado por el Consejo Técnico de la ENEP-Aragón se encontrara que en su bibliografía hace referencia a las notas del curso "Introducción al Control de Procesos Industriales" editados por la DIME Facultad de Ingeniería UNAM. Pero si nos damos a la tarea de buscarlas no tendremos éxito alguno ya que no se encuentran en la ENEP-Aragón, Facultad de ingeniería ni en la DIME ahora DIMEI.

La razón puede ser que estas notas ya sean antiguas y obsoletas y mejor se han retirado del alcance de alumnos y maestros.

Considero importante señalar que durante la carrera de IME no hay ninguna materia de automatización. Siendo este tema de gran importancia por el avance de la industria y el desarrollo del control de procesos en este campo. Por lo cual añado a los apuntes un capitulo sobre automatización, teniendo en cuenta que la finalidad no es extenderme sobre el tema; solo será una ayuda para cubrir lo que considero una carencia dentro del plan de estudios.

Objetivo del curso

El objetivo del curso aprobado por el consejo Técnico de la ENEP- Aragón y el Consejo Universitario para la materia de control de Procesos es el siguiente:

Presentar al alumno las técnicas de control analógico empleadas en el control de procesos industriales, así como los elementos analíticos requeridos para esta aplicación

CONTENIDO

Capitulo 1 INTRODUCCIÓN	7
1.1 Importancia del control	8
1.2 Historia del control	9
Capitulo 2 ELEMENTOS BÁSICOS DE CONTROL DE PROCESOS	
2.1 Definición de control	13
2.2 Definición de proceso	14
2.3 Definición de procesos industrial	15
2.4 Tipos de proceso industrial y ejemplos	15
2.5 Relación entre el control y los procesos industriales	19
2.6 Terminología y simbología de los componentes básicos de un sistema de control	20
2.7 Elementos finales de control	57
Capitulo 3 AUTOMATIZACIÓN	
3.1 Definición de automatización	61
3.2 Historia	62
3.3 Relación entre control de procesos y automatización	62
3.4 Automatización tipo Detroit	63
3.5 Automatización lineal o circular	63
3.6 Máquinas de control numérico	64
3.7 Robótica	66

Capítulo 4 CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES ELEMENTALES

4.1 Definición de variable controlada	70
4.2 Definición de variable manipulada	70
4.3 Definición de sistemas	70
4.4 Definición de perturbaciones	70
4.5 Control retroalimentado	70
4.5.1 Sistema de control de retroalimentación	73
4.5.2 Servosistemas	75
4.5.3 Sistemas de control de lazo cerrado	75
4.5.4 Sistemas de control de lazo abierto	76
4.6 Modelos matemáticos	77
4.7 Intercambiador de calor	85
4.8 Calderas industriales	91
4.9 Turbinas de vapor	94
4.10 Reactores químicos	96
4.11 Torres de destilación	98
4.12 Destilación Batch	103
4.13 Control de cascada	107
4.14 Control de relación	110
4.15 Control de rango dividido	111
4.16 Control anticipativo	112
4.17 Control prealimentado	115

Capitulo 5 **CARACTERÍSTICAS DINAMICAS DE LOS PROCESOS INDUSTRIALES**

5.1 Características de primer orden y orden mayor	116
5.2 Capacitancia simple y múltiple	122
5.3 Tiempo muerto de un proceso	126
5.4 Métodos empíricos de identificación	128

Capitulo 6 **ACCIONES DE CONTROL**

6.1 Control proporcional	132
6.2 Control integral	133
6.3 Control derivativo	133
6.4 Control - proporcional –integral	134
6.5 Control – proporcional- derivativo	135
6.6 Control – proporcional – integral – derivativo	135
6.7 Acción P	136
6.8 Acción PI	136
6.9 Acción PD	138
6.10 Acción PID	139
6.11 Aplicaciones	140
6.12 Error del sistema	142
6.13 Error integral cuadrático	143
6.14 Error integral absoluto	143

Capitulo 7 SELECCIÓN DE ELEMENTOS FINALES DE CONTROL

7.1 Generalidades	145
7.2 Tipos de válvulas	146
7.3 Cuerpo de la válvula	150
7.4 Tapa de la válvula	154
7.5 Partes internas	158
7.6 Características del caudal	160
7.7 Corrosión y erosión en las válvulas	169
7.8 Servomotor	173

Capitulo 8 ANÁLISIS Y MODELADO DE LAZO DE CONTROL SIMPLE DE VARIABLES COMUNES

8.1 Control de flujo	181
8.2 Control de presión	184
8.3 Control de nivel	185
8.4 Control de temperatura	187
8.5 Control de composición	189

Capitulo 9 APLICACIONES

9.1 Controladores programables	190
9.2 Control distribuido	191
9.3 Análisis de sistemas típicos de instrumentación y control	193
9.4 Selección de los elementos que constituyen un sistema típico de instrumentación y control	194

BIBLIOGRAFIA	197
---------------------	------------

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

Objetivo: Señalar la importancia del control de procesos en el sector industrial, así como involucramos en esta materia partir del origen y desarrollo de los sistemas de control de procesos.

El presente trabajo esta dividido en nueve capítulos los cuales pretenden abarcar todos los temas del curso.

En el primer capitulo se indica la importancia que tiene el control en el sector industrial.

En el segundo capitulo se introduce al control de procesos presentando los términos que se emplean comúnmente así como la simbología que se utiliza para los procesos.

En el tercer capitulo se estudia la automatización se explican sus antecedentes y su relación con los procesos industriales.

En el cuarto capítulo se estudian los modelos matemáticos de algunos procesos sus, parámetros y variables.

En el quinto capítulo se definen los procesos autorregulados y los retrasos en la respuesta de un sistema.

En el sexto capítulo se analizan los tipos de acciones de control y el error que se presenta en un sistema.

En el séptimo capítulo se estudian los elementos finales de control que son las válvulas pues dentro de los procesos continuamente hay que manejar y controlar fluidos.

En el octavo capítulo se analiza el modelo de los lazos de control de las variables de un proceso.

En el noveno capítulo se estudian los controladores programables y algunos ejemplos de sistemas de control así como los elementos que los constituyen.

1.1 Importancia del control de procesos

Las actividades económicas de cualquier país pueden ser agrupadas en cuatro procesos principales, los cuales constituyen un sistema económico. Estos son:

- Industrias primarias.
- Industrias de transformación
- Distribución de servicios
- Prestación de servicios

Las industrias primarias representan el proceso que suministra las materias primas que se necesitan en una economía moderna: minerales, combustibles, granos, productos alimenticios, lana, algodón, madera etc.

El suministro de estas materias primas es la actividad que corresponde a empresas tales como la agricultura, la minería, la explotación de bosques, la caza y la pesca, mismas que son llamadas industrias primarias.

En segundo lugar se hallan las industrias de transformación, es decir el conjunto de procesos mediante los cuales las materias primas se someten a la fabricación, o sea que se convierten en formas diversas a través de los procesos de manufactura. Los productos que se obtienen de estos procesos se pueden clasificar en dos grupos generales.

Semiacabados, que son artículos fabricados en parte y que pasan de un proceso a otro para ser sometidos a tratamientos posteriores y el grupo de los productos acabados, que son vertidos directamente al consumidor final. Los procesos de fabricación están a cargo de empresas tales como manufacturas de productos alimenticios, elaboración de bebidas, fabricación de textiles, fabricación de calzado, construcción de equipo eléctrico y electrónico.

El tercer procesos es el de distribución; gracias a ésta las materias primas y los artículos manufacturados pasan de productor a productor, de los productores a los vendedores y finalmente, a los consumidores. En esta parte se encuentran las llamadas empresas comerciales, las cuales facilitan el recorrido que hace la mercancía desde el estado de materia prima brutas pasando por las fases de tratamiento y fabricación, hasta los consumidores finales. En conjunto las operaciones de distribución consisten en la compra y venta de productos operaciones en las que los distribuidores actúan como intermediarios, por tanto asumen las actividades de almacenamiento selección clasificación empaque y transporte de artículos a los lugares en que se requieren.

Por último, la actividad correspondiente a la prestación de servicios la cual, últimamente ha aumentado considerablemente su importancia, a tal grado que actualmente ha alcanzado una posición preponderante, ya que si bien un gran número de personas se encargan de la producción y manejo de artículos tangibles, hay otras que realizan una variedad infinita de servicios en todos los niveles de un sistema económico tales como servicios domésticos, servicios profesionales y financieros a individuos y a empresas, servicios mecánicos en las fabricas y en las comunidades, el abastecimiento de calor, de luz y de energía y otros muchos similares que se clasifican generalmente como servicios públicos, así también

como los servicios de gobierno. Aunque la prestación de servicios no es un proceso en el sentido en que lo son la agricultura y la fabricación, es uno de los grandes campos en que se subdivide un sistema económico.

Ahora bien es muy importante señalar que el principal campo de aplicación del control se encuentra ubicado dentro del primer y segundo grupo, o sea en las industrias donde se producen y se transforman las materias primas, que es donde se requiere de la realización de varios procesos en los cuales se deben controlar las variables más importantes involucradas en estos, lo cual garantizará la calidad del producto, el éxito industrial y a su vez el avance en la economía del país.

Por ejemplo. En la industria de transformación para el control de la temperatura, presión, caudal, y variables similares. En la manufactura de artículos como repuestos o partes de automóviles. Para el control de ensambles, producción y tratamiento térmico de operaciones similares. En la realización de compresores bombas máquinas y herramientas; para el control de posición, velocidad y potencia.

Existen además algunas ventajas que proporciona el control en los procesos de producción como son:

- a) Aumento en la cantidad de número de productos
- b) Mejora de la calidad de los productos
- c) Economía de materiales
- d) Economía de energía o potencia
- e) Economía de equipos industriales
- f) Reducción de inversión de mano de obra en tareas no especializadas.

Estos factores generalmente contribuyen a aumentar la productividad y a elevar el nivel de educación en el sector obrero pues la aplicación del control en la industria crea la necesidad de desarrollar un sector semiespecializado capaz de desempeñar tareas de mayor responsabilidad; como el manejo y mantenimiento de equipos e instrumentos de control.

Todo esto hace que el control de Procesos sea una actividad básica en el sector productivo de un país en su industria y en el avance de su tecnología.

I.III Historia del control de procesos

Desde el advenimiento de la civilización, el hombre ha intentado constantemente reemplazar el esfuerzo humano por máquinas y por sistemas de control. Las primeras evidencias de la actividad consciente del hombre en el campo del control de procesos se encuentran en los sistemas de regadíos en Babilonia, sobre el 2000 A.C. y conocidas a través de las leyes grabadas en el código de Hamurabi.

En la antigüedad griega se encuentran vestigios del uso de sistemas de control realimentado. Los reguladores de flotación fueron usados en los relojes de agua Ktesibios y en las lámparas de aceite de Philon, allá en el 250 A.C. Trescientos años más tarde, Heron

De Alejandría publicó en el primer siglo, su libro de Pneumatica, en el cual se discutían varias formas de control del nivel del agua, en los que se incluían reguladores de flotación.

El conocimiento de los sistemas de control en el periodo helénico fue preservado por la cultura islámica y redescubierto al final del Renacimiento.

El primer sistema de control realimentado reconocido oficialmente en la Europa moderna es el regulador de temperatura inventado por el alemán Cornelius Drebbel (1572-1663), desarrollado para calentar un incubador.

Otro sistema de control que goza de auténtico crédito es el sistema inventado por Meikleen en 1750, consiste en colocar unas aspas auxiliares de cola en el mismo eje de las aspas principales de los molinos con el objeto de optimizar el aprovechamiento de la energía eólica.

Si bien a lo largo del siglo XVIII se empiezan a despuntar los dispositivos de control su zenit llega con el regulador centrífugo de James Watt (1736-1819). A éste se le puede tomar como punto de partida para trazar el desarrollo del control de procesos como disciplina científica. Se trata de un dispositivo que proporcionaba una acción de control proporcional en la regulación de la velocidad en las máquinas de vapor. A mediados del XIX, Siemens (1823-1883) modifica el regulador de Watt, dotándole de acción de control “flotante”, sin referencia fija.

Maxwell (1831-1879), inició así la teoría de los sistemas de control automático con su trabajo *On governors* (1868). La contribución de Maxwell fue reconocer que la conducta de un sistema de control automático en la velocidad de una posición de equilibrio se podía aproximar por una ecuación diferencial lineal, y por tanto su estabilidad se podía discutir en términos de las raíces de una ecuación algebraica. De esta manera, Maxwell planteó el problema general de investigar la estabilidad de un sistema dinámico en función de localizar las raíces de su ecuación característica. Él llegó a especificar que un sistema era inestable cuando la parte real de sus raíces complejas fuesen positivas, pero el problema era cómo determinar la localización de las partes reales sin calcular las soluciones de la ecuación para sistemas de orden elevado.

La solución del problema planteado por Maxwell la dio a Edward J. Routh (1831-1907) en 1877, abordando de forma matemática la estabilidad del sistema de orden alto basándose en los trabajos de Cauchy. En 1895, Adolf Hurwitz resolvía el problema de la estabilidad de sistemas lineales en términos de un conjunto de determinantes.

También el matemático ruso A. M. Lyapunov estudió el tema de la estabilidad en 1892, utilizando las ecuaciones no lineales del movimiento; sin embargo, sus trabajos no se aplicaron al control hasta 1958.

La mayor parte de las invenciones y aplicaciones de este periodo están relacionadas con actividades básicas, como son el control de temperaturas, presiones nivel de los líquidos, velocidades de rotación en ejes de maquinarias, etc. El objetivo era regular y asegurar la estabilidad. La introducción de sistemas neumáticos, de vapor o hidráulicos, en grandes buques y cañones inicia el interés hacia los mecanismos de control de posición hacia el último cuarto de siglo del XIX, apareciendo el término de servomotor en 1873.

Conforme los dispositivos y los sistemas de control empezaron a ser utilizados en diferentes áreas de la ingeniería, se hicieron patentes dos problemas básicos:

1. La falta de entendimiento teórico para discutir los problemas que surgían, sin un lenguaje en común.
2. No existían métodos de análisis y diseños simples y fáciles de aplicar.

Los ingenieros de control se encontraban confusos ya que los controladores que funcionaban satisfactoriamente para una aplicación no lo hacían igual para otras. En ocasiones, se producían la inestabilidad de un sistema que en un principio era estable. Por otro lado, en esta época comienzan a manifestarse dos tipos de enfoques distintos para el análisis de los sistemas dinámicos:

1. El uso de las ecuaciones diferenciales, utilizadas por los especialistas en mecánica con el auxilio de las técnicas de transformación desarrolladas por Laplace.
2. La representación de los aparatos como cajas en las que entran y salen ciertas señales adecuadas, enfoque preferido por los expertos en comunicaciones. Estas cajas reales fueron sustituidas por cajas abstractas cuyo análisis se realizaba mediante técnicas basadas en las transformadas de Fourier.

La necesidad de obtener amplificadores de señal para compensar las pérdidas en los cables de transmisión, con muy bajo nivel de distorsión, llevaron a Harold S. Black (1898-1983) en 1934 a la invención del amplificador realimentado. A pesar de su importancia, esta invención fue acogida con recelo en algunos sectores al ir en contra de ciertos artículos que afirmaban que la salida de un amplificador no se podía conectar a su entrada y permanecer estable a menos que la ganancia del lazo fuese menor que uno.

En efecto, los amplificadores construidos hacia 1932 presentaban ciertas tendencias, mal comprendida, a inestabilizarse. El análisis de estos sistemas utilizando técnicas clásicas basadas en ecuaciones diferenciales (el enfoque “mecánico”) era impensable, aunque estos dispositivos podían contener más de 50 elementos almacenadores de energía independiente. Harry Nyquist (1889-1976) propuso, en 1932, una solución a este problema basándose en la forma de la respuesta en frecuencia de la ganancia de lazo abierto. La gran importancia de este trabajo radica en su enfoque totalmente novedoso al basarlo únicamente en medidas experimentales y no en la disponibilidad de un modelo en forma de ecuaciones diferenciales. Además, el lugar de Nyquist indicaba claramente cómo mejorar la estabilidad de un sistema realimentado modificando adecuadamente su ganancia en lazo abierto en función de la frecuencia.

Nyquist dejó abierto el problema de cómo se relacionan la amplitud y la fase, este problema fue resuelto por Hendrik Bode, en 1940, al introducir los términos de margen de fase y de margen de ganancia.

Aunque desde la mitad de la década de los 20 los controladores todo –nada (on-off) habían sido muy utilizados en procesos industriales, es durante estos años cuando para resolver y mejorar los problemas de regulación de las máquinas se produjeron controladores más avanzados. En 1922, Nicholas Minorsky (1885-1970) presenta un análisis claro de los

sistemas de control de posición, y formuló la ley de control que hoy se conoce como control PID. Una contribución de gran importancia fue la de J.G. Ziegler y N.B Nichols (1942) que propusieron unas formulas empíricas para asignar los coeficientes de las distintas acciones basándose en valores del proceso a controlar y que son medidos experimentalmente

No es posible dar una visión global de la llamada teoría clásica, sin detenerse en el trabajo de Evans. En 1948, completó el desarrollo de las técnicas basadas en variable compleja al introducir el lugar de las raíces. Este método permite hacer deducciones sobre las raíces de la ecuación característica en lazo cerrado cuando varía un parámetro de la planta y por lo tanto, estudiar así su estabilidad.

La necesidad de controlar la posición de las antenas de radar en función de unos datos disponibles de forma intermitente, motivó el estudio de los sistemas muestreados. La aplicación de las computadoras al control de procesos industriales en los años cincuenta favoreció el estudio y desarrollo de los sistemas discretos. Los primeros estudios publicados sobre estos temas son los de Shanon (1948), que trataban sobre el muestreo de señales. Posteriormente Salzer utilizó por primera vez la transformada z , sobre la que desarrolló la teoría sobre sistemas muestreados. Posteriormente, estos avances fueron sintetizados con las aportaciones de Jury, Ragazzini, Franklin, Tou, entre otros. Hasta ese momento, gran parte de la teoría de control discreta se apoyaba en métodos de análisis y diseño basados en la frecuencia, pero la interpretación de z^{-1} como operador retardo hizo evolucionar la teoría al análisis en el dominio del tiempo.

En su mayor parte, la teoría clásica de control estudia sólo los sistemas dinámicos deterministas, lineales y parámetros constantes, de una sola entrada y una sola salida, resultando de gran complejidad cuando se trataba de sistemas de múltiples entradas y salidas, no lineales, de parámetros variables con el tiempo. Estas limitaciones, junto con la necesidad de una mayor precisión en el diseño de sistemas de control, que surgió como consecuencia de los avances en las tecnologías aeroespaciales, hacían que la teoría clásica fuera insuficiente para la resolución de los problemas que se presentaban, Por otro lado, el desarrollo del computador digital ofrecía una potente herramienta sobre cómo implementar algoritmos de control complejos.

A partir de la segunda mitad del siglo XX se inicia una gran revolución en las técnicas de control; la guerra fría, la era aeroespacial y la aparición de los computadores digitales producen una efervescencia de las nuevas teorías de control, siendo el control automático de procesos parte del progreso industrial. El uso intensivo de la ciencia de control automático es producto de una evolución que es consecuencia del uso difundido de las técnicas de medición y control, su estudio intensivo ha contribuido al reconocimiento universal de sus ventajas.

CAPITULO II

ELEMENTOS BASICOS DE CONTROL DE PROCESOS

Objetivo: Familiarizar al alumno con los símbolos y términos usualmente empleados en el control de procesos así como en la interpretación de los diagramas de ingeniería propios de este campo.

2.1 Definición de control

Para definir los elementos que intervienen en el control de procesos es necesario comenzar definiendo las palabras control y proceso para entender su relación con la industria.

Control significa: Comprobación, inspección, fiscalización, intervención y regulación manual o automática, sobre un sistema¹.

Control en general es todo lo que guía dirige, regula y vincula. Controlar es aplicar a la energía y a la actividad vinculaciones orientadas a objetivos específicos²

Se tiene que Control significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar al sistema la variable, manipulada para corregir o limitar la desviación de valor medido, respecto al valor deseado³

Por ultimo

La palabra control generalmente se usa para designar regulación, dirección o comando.

¹ Según la Real Academia de la lengua Española

² Según el libro Elementos de la Ingeniería de Sistemas Industriales del Autor C. Blair

³ Según el libro Ingeniería de control moderna del Autor Ogata

2.2 Definición de procesos

Etimológicamente, proceder significa “continuar realizando cierta acción que requiere un orden.”

Proceso significa acción de ir hacia delante. Transcurso del tiempo. Conjunto de las frases sucesivas de un fenómeno natural o de una operación artificial.⁴

Se denomina Proceso a cualquier operación que deba controlarse.⁵

Procedimiento, es una “sucesión, serie de cosas que siguen una a otra” y proceso “marcha hacia delante (progreso). Desarrollo o marcha de alguna cosa.

Si se habla de análisis del proceso, se refiere a las diferentes etapas que componen de una manera ordenada – escalonada- la realización de alguna cosa.

CONTROL DE PROCESOS

Tomando en cuenta todo lo anterior podemos decir que el control como proceso esta encaminado a buscar un equilibrio para el sistema implicando la localización de restricciones (inspección) en las acciones ejecutadas para decidir que medidas hay que tomar una vez comparadas con lo planificado para retornar a la organización de los niveles de actuación previstos

La finalidad de todo proceso de control es asegurar que el sistema no se salga del curso trazado, para alcanzar sus objetivos, ya que la planificación de estos forman parte del proceso.

Para ello los hechos deben estar lo más cerca posible de lo planificado

En nuestro caso los procesos a controlar serán en su mayoría procesos de producción industriales lo cual nos lleva a definir que es un proceso industrial

⁴ Según la Real academia de la lengua española

⁵ Según el libro Ingeniería de control moderna del Autor Ogata

2.3 Definición de proceso industrial

Proceso Industrial se puede definir como las fases consecutivas en la elaboración de un producto, o también como un método o sistema adoptado para llegar a un determinado fin.

El proceso de producción industrial precisa de ciertos elementos como la materia prima, la mano de obra calificada y una cierta tecnología más o menos compleja. El resultado del proceso de producción será el producto, eje entorno al cual gira todo el proceso de producción. Dicho producto ostentará una serie de características, de entre ellas una es fundamental desde el punto de vista de la gestión y el control de la producción: La calidad del producto.

Luego entonces los procesos industriales a controlar pueden dividirse ampliamente en 2 categorías

- a) Procesos Físicos Básicos
- b) Procesos Químicos Básicos

De las cuales se estudiarán y se verán algunos ejemplos en el siguiente tema.

2.4 Tipos de procesos industriales y ejemplos

En la fabricación de cualquier producto se requiere, en general, de la realización de uno o varios procesos parciales que pueden ser más o menos independientes.

- b) Procesos físicos básicos

Solo raras veces se puede someter a una transformación una materia prima en la forma en que es obtenida; lo común es que antes de la elaboración haya una fase de preparación y acondicionamiento. Los procesos básicos necesarios para esto se pueden dividir en almacenaje, transporte, trituración, tamizado, desempolvado, mezclado, disolución, absorción, filtración, decantación, centrifugación., calentamiento, refrigeración, concentración, desecación, destilación y sublimación.

Estos procesos básicos tienen principalmente naturaleza física, pero no se les puede trazar un límite estricto, dado que pueden estar incluidas al mismo tiempo algunas transformaciones químicas (la disolución y la destilación son ejemplos claros de esto).

- b) Procesos Químicos Básicos

Aunque los procesos físicos básicos son muy importantes, no suelen constituir el núcleo del proceso total, sino que éste radica más a menudo en la realización de las reacciones químicas a las cuales se les denomina como procesos químicos básicos.

Por ejemplo: Los procesos térmicos desempeñan un papel importante, especialmente en química inorgánica y tienen lugar frecuentemente en la compañía de reacciones de óxido-reducción. Así sucede en el tostado, la calcinación, la caustificación, etc.

En química orgánica se presenta la fabricación de combustibles gaseosos en coquerías, en procesos de cráquino, etc. La gran cantidad de calor necesaria para efectuar esta operación se obtiene muchas veces de la reacción misma, pero también es suministrado frecuentemente desde el exterior empleando combustibles sólidos o gaseosos, de energía eléctrica y en algunos casos, utilizando hornos de arco eléctrico.

En química orgánica la introducción, la transformación y el intercambio de substituyentes desempeñan un papel de gran importancia; por ejemplo: alquilación, halogenación, sulfuración, sulforación, reducción, etc.

Los métodos de condensación y polimeración constituyen principalmente los dominios de la industria de resinas y fibras artificiales.

Los productos de fermentación, limitados anteriormente a la industria alimenticia, han alcanzado considerable importancia en los últimos años en la producción de medicamentos que actúan como antibióticos.

EJEMPLO DE PROCESOS INDUSTRIALES

Con objeto de ilustrar las diferentes etapas que se distinguen en los procesos industriales, se describen someramente tres de ellos:

La fabricación del papel, fabricación del cemento y la refinación del petróleo.

a) Fabricación del papel

El método que a continuación se describe para la fabricación del papel es el usado para el caso de papel higiénico y papel de oficina, o sea donde la materia prima principal es el bagazo de caña proveniente de los ingenios azucareros.

El proceso es descrito con base a cuatro grandes áreas de fabricación las cuales son: acondicionamiento, pulpa, blanqueo y máquinas de papel, tal como se muestra en la figura 2.1.

El área de acondicionamiento, o primer paso, corresponde a la fase en que el bagazo es preparado para obtener un desmedulado y poder separar la fibra que es el material que nos interesa. En esta parte las placas de bagazo provenientes de los ingenios son suministrados al proceso, a lo largo del cual se les extrae toda clase de impurezas., tales como: alambres, piedras, tierra, etc. Se efectúa también la separación de fibras largas y fibras cortas; estas últimas son las útiles para la producción. La sección mecánica correspondiente está formada por bandas transportadoras, trampas magnéticas, tolvas, tanques de retención, tanques de mezcla, gusanos separadores de fibra, hidrolimpias, etc.

Por tanto es fácil observara que las principales variables a controlar serán: velocidad, flujo, nivel y consistencia.

Una vez obtenida la fibra útil pasa a la parte de impregnación donde se le añade sosa cáustica y vapor a presión con el objeto de empezar el cocimiento que se efectuará en la sección pulpa; aquí la fibra es molida y tratada nuevamente con sosa hasta obtener la llamada pulpa morena que después de ser lavada en las lavadoras de sosa, será enviada hacia la sección de blanqueo.

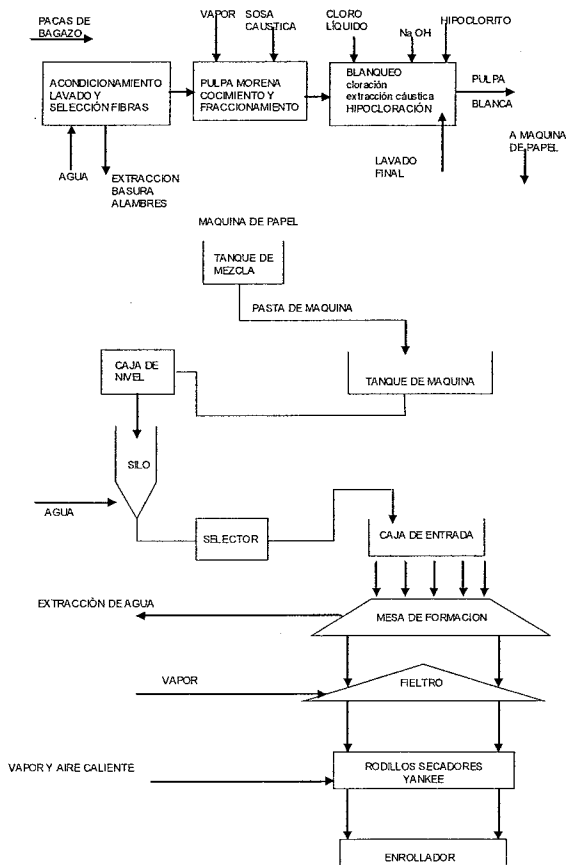


Fig.2.1

En esta sección de pulpa se tienen digestores, prensas, transportadores y diferentes tanques intermedios entre cada paso. Las variables más importantes a controlar en esta parte son: consistencia de la fibra, temperatura en los digestores, cantidad de sosa alimentada y tiempos de reacción y cocimiento.

Una vez que la fibra tiene el cocimiento y tamaño requeridos es depurada y lavada para entrar a la sección de blanqueo, donde el primer paso es el de regular la consistencia para posteriormente pasar a las reacciones de cloración extracción cáustica e hipocloración, que tiene como función blanquear la pulpa y extraer cualquier residuo de sosa e impurezas que aún pueda contener. Después de la reacción con el hipoclorito de sodio (aquí es muy importante el control del pH y de la temperatura para no degradar mucho la pulpa) la pulpa es lavada y enviada a las máquinas de papel.

En las máquinas de papel la pulpa es mezclada con colorantes, otro tipo de fibras (fibra larga, pasta mecánica) y compuestos químicos (sulfito, sulfato de aluminio) que darán al papel las características deseadas.

De acuerdo con el diagrama de flujo de este proceso tenemos: obtenidos los componentes en el tanque de mezcla, la pasta es mandada al tanque de máquina donde se deberá mantener un nivel constante para que nunca falte pasta a la máquina.

De ahí se envía a un silo que es un tanque donde se baja la consistencia hasta obtener una pasta casi completamente líquida.

Del silo pasa a un selector donde se eliminan las impurezas y se alimenta con la pasta pura resultante a la caja de entrada, la cual distribuye pasta a una mesa de formación en donde, por medio de una tela metálica, se extrae parte del agua y se forma la hoja de papel.

Ya formada la hoja de papel se lleva a través de un paso de filtrado donde se le extrae otra parte de agua y se envía a los rodillos secadores o yankee donde se seca por medio de un vapor y aire caliente, para pasar finalmente al enrollado.

Las variables más importantes involucradas en este proceso son: PH, nivel, velocidad, flujo y presión de vapor

b) Fabricación del cemento

El cemento es una sustancia adhesiva, susceptible de que se le adicionen fragmentos o partículas de materiales sólidos para formar un material compacto. Las materias primas principales que se emplean en su fabricación son caolín, sílice, caliza y, en pequeñas proporciones yeso y calcita.

Existen dos diferentes tipos de proceso para la fabricación del cemento: el proceso seco y el proceso húmedo.

i) Proceso seco.- Este tipo de proceso es el más utilizado debido a sus mayores ventajas económicas.

El primer paso es la obtención de las materias primas: caliza, caolín y sílice, las cuales se hayan en forma natural, son extraídos mediante taladros neumáticos y palas mecánicas y se transportan hacia un sistema de trituración y molido, que se efectúa en una serie de máquinas adaptadas al tamaño decreciente de las partículas en proceso. Una vez triturados y antes de entrar a los molinos, los materiales se introducen a los secadores rotatorios por la parte superior, donde por medio de gases calientes (suministrado por la parte inferior) son secados. Una vez triturados y secos la caliza y el barro se incorporan, dosificándolos adecuadamente con básculas automáticas. Esta mezcla pasa a unos molinos tubulares para ayudar a pulverizar los materiales.

Existe un sistema de clasificación en la molienda por tamaño de material que sale del molino con el fin de que la parte final pueda continuar al siguiente paso y el grueso regrese al molino; esta clasificación se efectúa por decantación y separación por medio del aire (separadores de aire).

Cuando el material sale de los molinos se envía a los silos de homogenización, donde como el nombre lo indica, se homogeniza y se almacena, de manera que la báscula alimentadora pueda proporcionar (por medio de una bomba neumática) al horno una mezcla de características apropiadas.

Posteriormente se enfría esta mezcla por medio del contacto con el aire; después pasa a las básculas alimentadoras que proporcionan la mezcla y el yeso requerido por el molino de cemento donde se obtiene la finura necesaria lo cual depende del tipo de cemento deseado. Este cemento es almacenado y envasado para su distribución.

ii) Proceso húmedo. La diferencia entre éste y el proceso seco radica en que la arcilla no es totalmente triturada, sino que se descarga una parte en un molino de rastrillos que la desmenuza con agua, produciendo una mezcla con la parte de arcilla triturada previamente, para pasar posteriormente a los molinos de crudo.

Ya que la evaporación del agua de esta mezcla representa un mayor consumo de combustible, este método es poco usado.

Las principales variables a controlar involucradas en este tipo de proceso son: humedad de las materias primas, tamaño de las partículas molidas, la proporción exacta de cada mezcla, la temperatura de los hornos y el peso de los sacos que contienen el producto final.

c) Refinación del Petróleo

El petróleo es una combinación de hidrocarburos con pesos moleculares diversos. Entre los componentes principales del petróleo se tienen: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y diferentes tipos de sales.

El petróleo se extrae del interruptor de la tierra mediante pozos y se envían a la refinería para ser almacenado y transformado. La separación de los hidrocarburos que forman el petróleo crudo se hace mediante columnas de destilación, aprovechando las diferencias de volatilidad que tienen los diversos componentes. El procedimiento consiste en calentar el petróleo crudo a una temperatura tal que los componentes ligeros se evaporan y posteriormente se condensan los hidrocarburos evaporados. La condensación se efectúa a diferentes temperaturas ya que los hidrocarburos más volátiles se condensan a menor temperatura que los menos volátiles. De esta manera se obtienen distintas sustancias condensadas cuyas propiedades corresponden a la del gas licuado, gasolina, keroseno o combustible diesel.

Para obtener nuevos productos, o bien mayor pureza de los ya obtenidos, se repite el procedimiento empleando otras columnas de destilación o alambiques purificadores. Las principales variables a controlar en este tipo de proceso son: la presión y flujo en el oleoducto; la temperatura, flujo de entrada y presión en las columnas de destilación; la temperatura y la concentración de los productos obtenidos.

2.5 Relación entre el control y los procesos industriales

En cualquier proceso industrial es necesario ajustar adecuadamente los procesos, repetirlos en forma continua y reducir sus errores, esto ha obligado a los ingenieros a desarrollar una tecnología especializada en cuanto al control de procesos.

Este desarrollo se presentó primeramente en cuanto a mediciones, después a registro y finalmente en el control.

Las mediciones en la industria juegan un papel básico; sin embargo, la experiencia ha demostrado que por sí solas son insuficientes para mejorar el costo del proceso, dar mayor uniformidad a la producción y aumentar la calidad de los productos.

Debido a esto fue necesario desarrollar la técnica del control automático, la cual ha producido una gran revolución industrial.

Para poder estudiar un proceso industrial en particular, es necesario descomponerlo en una serie de operaciones básicas, por ejemplo calentamiento trituración transporte, etc. Esto es posible hacerlo siempre y cuando el tiempo que se requiere para realizar cada una de estas operaciones sea muy pequeño en comparación con el tiempo del proceso total.

Tendremos entonces que el control automático será la operación de llevar una o más variables a su punto óptimo de trabajo y mantener toda la operación ajustada a los valores prefijados, cualesquiera que sean los cambios que en ella se produzcan. Para realizar esta operación es necesario conocer los hechos que ocurren en el proceso y que interesan para poderlo controlar. Para cuantificarlos se requiere evaluar variables tales como temperatura, presión, conductibilidad, etc. Estas señales deben ser captadas y transformadas en magnitudes que se pueden medir, transmitir y, si es necesario, amplificar, para su mejor manejo y utilización posterior.

Una vez que se ha determinado la magnitud de la variable que se desea controlar, se debe comparar con el valor deseado y, si existe una discrepancia, se debe ajustar la energía suministrada al proceso, de tal manera que corrija la desviación existente. Esta operación se puede hacer en forma manual, con la presencia de un operario, o en forma automática mediante un dispositivo que se denomina controlador

2.6 Terminología y simbología de los componentes básicos de un sistema de control

En esta sección se define la terminología necesaria para describir los sistemas de control.

Un sistema de control es un conjunto de componentes físicos conectados de tal manera que el mismo pueda comandar, dirigir o regularse a sí mismo o a otro sistema.

En el sentido más abstracto es posible considerar cada objeto físico como un sistema de control.

El caso de un espejo que dirige un haz de luz que incide sobre él, puede considerarse como un sistema elemental de control, el cual controla el haz de luz de acuerdo con la relación “el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia”.

El sistema ilustrado en la figura 2.2 consiste en un espejo pivoteado en uno de sus extremos, que puede moverse hacia arriba o hacia abajo por medio de un tornillo en el otro

extremo, el cual se denomina propiamente un sistema de control. El ángulo de la luz reflejada se regula por medio del tornillo.

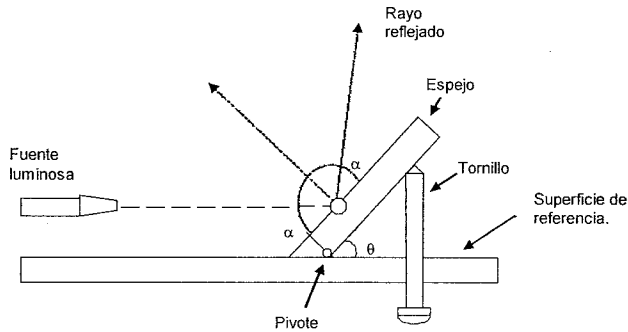


Fig.2.2

Sistema de control de procesos. Un sistema de regulación automático en el que la salida es una variable como temperatura, presión, flujo, nivel de líquido o pH, se llama sistema de control de procesos.

El control de procesos tiene una amplia aplicación en la industria ya que los procesos industriales exigen el control de la fabricación de los diversos productos obtenidos. Los procesos son muy variados y abarcan muchos tipos de productos; la fabricación de los productos derivados del petróleo, de los productos alimenticios, la industria papelera, la industria textil, etc.

Los sistemas de control pueden dividirse en dos categorías: sistemas de control de lazo cerrado y sistemas de control de lazo abierto⁶. En ambos casos se observa que existen elementos definidos como elementos de medida; como son el transmisor, el controlador, el indicador, el registrador los elementos finales, etc.

Los instrumentos de control empleados en las industrias de proceso tales como química, petroquímica, alimenticia metalúrgica energética textil papel, etc., tienen su propia terminología; los términos empleado definen las características propias de medida y de control de los diversos instrumentos utilizados.

La terminología empleada se ha unificado con el fin de que los fabricantes, los usuarios y los organismos o entidades que intervienen directa o indirectamente el campo de la instrumentación industrial empleen el mismo lenguaje. Las definiciones de los términos empleados se relacionan con las sugerencias hechas por SAMA (Scientific Apparatus Makers Association) en su norma PCM 20-2-1970.

⁶ Estos términos se definirán en el capítulo 4

CAMPO DE MEDIDA (range)

Espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida o de transmisión del instrumento. Un término derivado es el de dinámica de medida o rangeabilidad (rangeability) que es el cociente entre el valor de medida superior e inferior de un instrumento.

ALCANCE (span)

Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento.

ERROR

Es la diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida. Si el proceso está en condiciones de régimen permanente existe el llamado error estático. En condiciones dinámicas el error varía considerablemente debido a que los instrumentos tienen características comunes a los sistemas físicos: absorben energía del proceso y esta transferencia requiere cierto tiempo para ser transmitida, lo cual da lugar a retardos en la lectura del aparato. Siempre que las condiciones sean dinámicas, existirá en mayor o menor grado el llamado error dinámico (diferencia entre el valor instantáneo de la variable y el indicado por el instrumento): su valor depende del tipo de flujo del proceso, de su velocidad, del elemento primario (termopar, bulbo y capilar), de los medios de protección, etc. El error medio del instrumento es la medida aritmética de los errores en cada punto de la medida determinados para todos los valores crecientes y decrecientes de la variable medida.

Cuando una medición se realiza con la participación de varios instrumentos, colocados unos a continuación de otros, el valor final de la medición estará constituido por los errores inherentes a cada uno de los instrumentos.

INCERTIDUMBRE DE LA MEDIDA

Los errores que existen necesariamente al realizar la medida de una magnitud, hacen que se tenga una incertidumbre sobre el verdadero valor de la medida. La incertidumbre es la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente al verdadero valor de la magnitud medida. En el cálculo de la incertidumbre intervienen la distribución estática de los resultados de series de mediciones, las características de los equipos etc.

EXACTITUD

Es la cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida.

PRECISION (ACCURACY)

La precisión es la tolerancia de medida o de transmisión del instrumento y define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio. Hay varias formas para expresar la precisión

- a) Tanto por ciento del alcance.
- b) Directamente, en unidades de la variable medida
- c) Tanto por ciento de la lectura efectuada

- d) Tanto por ciento del valor máximo del campo de medida.
- e) Tanto por ciento de la longitud de la escala.

La precisión varía en cada punto del campo de medida si bien, el fabricante la especifica en todo el margen del instrumento indicando a veces su valor en algunas zonas de la escala. Cuando se desea obtener la máxima precisión del instrumento en un punto determinado de la escala, puede calibrarse únicamente para este punto de trabajo, sin considerar los valores restantes del campo de medida.

Hay que señalar que los valores de precisión de un instrumento se consideran en general establecidos para el usuario, es decir, son los proporcionados por los fabricantes de los instrumentos. Sin embargo, estos últimos suelen considerar también los valores de calibración en fábricas y de inspección.

Con ello se pretende tener un margen de seguridad para compensar los efectos de las diferencias de apreciación de las personas que efectúan la calibración, las diferentes precisiones de los instrumentos de medida utilizados, las posibles alteraciones debidas al desplazamiento del instrumento de un punto a otro, los efectos ambientales y de envejecimiento, etc.

ZONA MUERTA

Es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento, es decir que no produce su respuesta. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida.

SENSIBILIDAD (sensitivity)

Es la razón entre el incremento de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona, después de haberse alcanzado el estado de reposo. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida.

Hay que señalar que no debe confundirse la sensibilidad con el término de zona muerta: son definiciones básicamente distintas que antes era fácil confundir cuando la definición inicial de la sensibilidad era “valor mínimo en que se ha de modificar la variable para apreciar un cambio medible en el índice o en la pluma de registro del instrumento”

REPETIBILIDAD (REPEATABILITY)

La repetibilidad es la capacidad de reproducción de las posiciones de la pluma o del índice o de la señal de salida, del instrumento al medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación recorriendo todo el campo. Se considera en general su valor máximo (repetibilidad máxima) y se expresa en tanto por ciento del alcance.

Para determinarla, el fabricante comprueba la diferencia entre el valor verdadero de la variable y la indicación o señal de salida del instrumento recorriendo todo el campo, y partiendo, para cada determinación, desde el valor mínimo del campo de medida.

HISTERESIS (hysteresis)

La histéresis es la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por el índice o la pluma del instrumento para el mismo valor cualquiera del campo de medida cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos ascendente y descendente.

Se expresa en tanto por ciento del alcance de la medida.

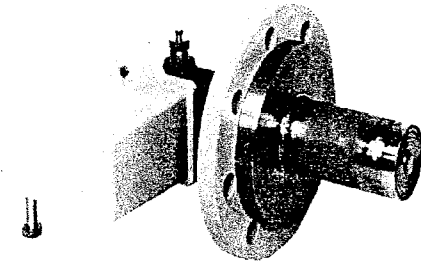
DEFINICIÓN DE INSTRUMENTOS

Se consideran dos clarificaciones básicas para los instrumentos: la primera relacionada con la función del instrumento y la segunda con la variable del proceso.

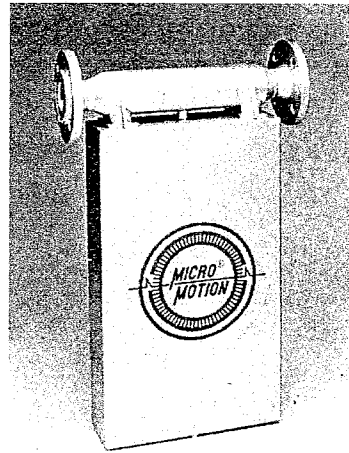
En función del instrumento

De acuerdo con la función del instrumento, obtenemos las formas siguientes:

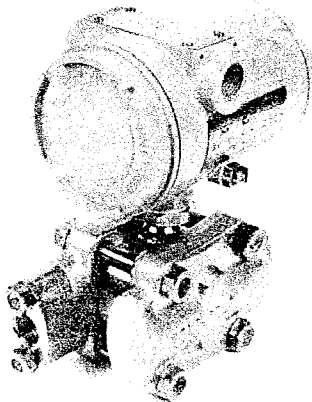
Instrumentos ciegos (fig.2.3) son aquellos que no tienen indicación visible de la variable. Hay que hacer notar que son ciegos los instrumentos de alarma tales como presostatos y termostatos (interruptores de presión y temperatura respectivamente) que poseen una escala exterior con un índice de selección de la variable, ya que sólo ajustan el punto de disparo del interruptor o conmutador al cruzar la variable el valor seleccionado. Son también instrumentos ciegos, los transmisores de caudal, presión, nivel y temperatura sin indicación.



(Cortesía de Siemens)



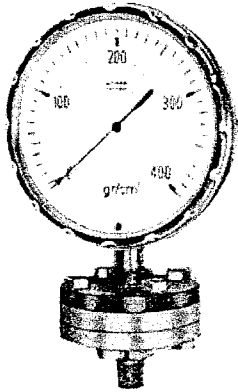
(Cortesía de Rosemount)



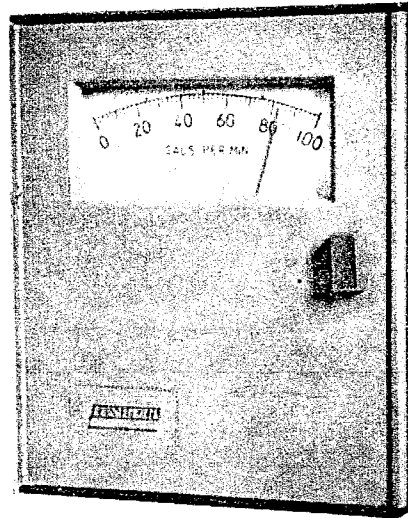
(Cortesía de ABB-Kent-Taylor)

Fig. 2.3 Instrumentos ciegos

Los instrumentos indicadores (Fig. 2.4) disponen de un índice y de una escala graduada en la que puede leerse el valor de la variable. Según la amplitud de la escala se dividen en indicadores concéntricos y excéntricos. Existen también indicadores digitales que muestran la variable en forma numérica con dígitos



(Cortesía de Bourdon)

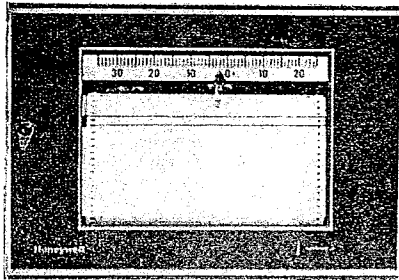


(Cortesía de Foxboro)

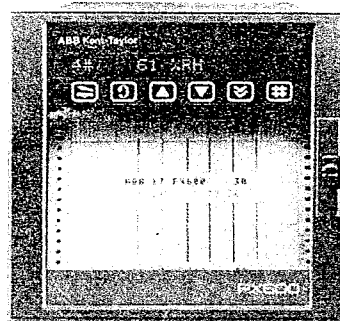
Fig. 2.4 Instrumentos indicadores

Los instrumentos registradores (Fig. 2.5) registran con trazo continuo o a puntos la variable, y pueden ser circulares o de gráfico rectangular o alargado según sea la forma del gráfico.

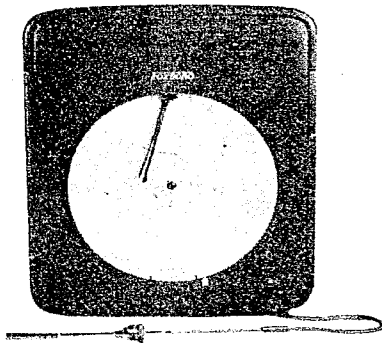
Los registradores de gráfico circular suelen tener el gráfico de 1 revolución en 24 horas mientras que en los de gráfico rectangular la velocidad normal del gráfico es de unos 20 mm/hora.



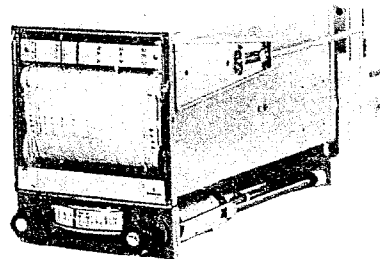
(Cortesía de Honeywell)



(Cortesía de ABB-Kent-Taylor)



(Cortesía de Foxboro)



(Cortesía de Siemens)

Fig. 2.5 Instrumentos registradores

Los elementos primarios (Fig. 2.6) están en contacto con la variable y utilizan o absorben energía del medio controlado para dar al sistema de medición una indicación en respuesta a la variación de la variable controlada. El efecto producido por el elemento primario puede ser un cambio de presión, fuerza posición medida eléctrica, etc. Por ejemplo: en los elementos primarios de temperatura de bulbo y capilar, el efecto es la variación de presión

del fluido que los llena y en los de termopar se presenta una variación de fuerza electromotriz.

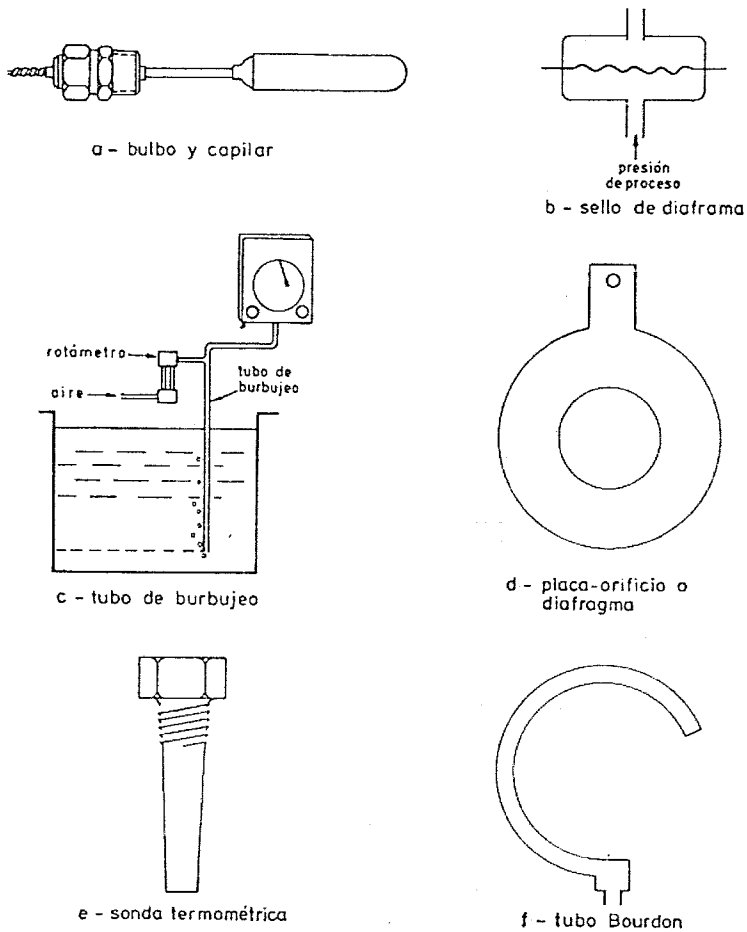
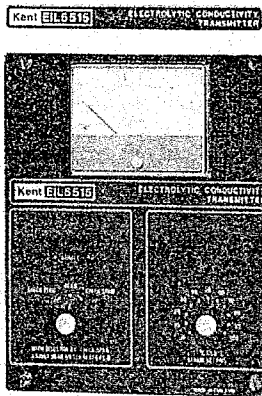


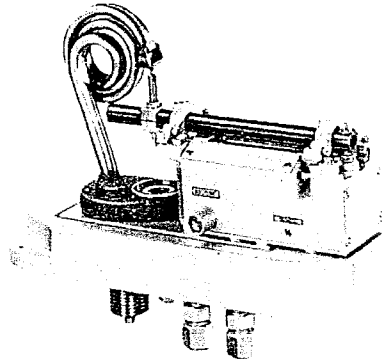
Fig. 2.6 Elementos primarios

Los transmisores (Fig. 2.7) captan la variable de proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática de margen 3 a 15 psi (libras por pulgada cuadrada) o electrónica de 4 a 20 mA de corriente continua. La señal neumática de 3 a 15 psi equivale a 0,206 – 1,033 bar (0,21 – 1,05 Kg/cm²) por lo cual, también se emplea la señal en unidades métricas 0,2 a 1 bar (0,2 a 1 Kg/cm²). Así mismo se emplean señales electrónicas de 1 a 5 mA c.c., de 10 a 50 mA c.c. y de 0 a 20 mA c.c., si bien la señal

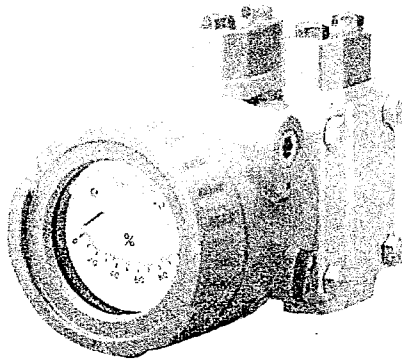
normalizada es de 4-20 mA c.c. La señal digital utiliza en algunos transmisores inteligentes es apta directamente para ordenador. El elemento primario puede formar o no parte integral del transmisor; el primer caso lo constituye un transmisor de temperatura de bulbo y capital y el segundo un transmisor de caudal con la placa orificio como elemento primario.



(Cortesía de ABB-Kent-Taylor)



(Cortesía de Siemens)



(Cortesía de Fischer Porter)

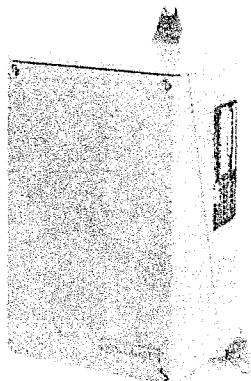
Fig. 2.7 Transmisores

Los transductores reciben una señal de entrada función de una o más cantidades físicas y la convierten modificada o no a una señal de salida. Son transductores, un relé un elemento primario un transmisor un convertidor PP/I (presión del proceso a intensidad), un convertidor PP/P (presión de proceso a señal neumática), etc.

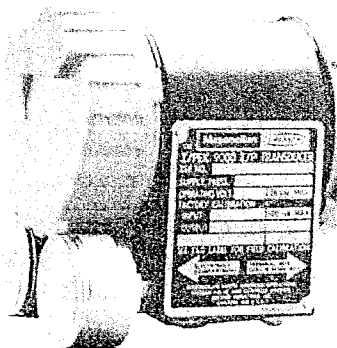
Los convertidores (Fig. 2.8) son aparatos que reciben una señal de entrada neumática (3-15psi) o electrónica (4-20 mA c.c) procedente de un instrumento y después de modificarla envían la resultante en forma de señal de salida estándar.

Ejemplo: un convertidor P/I (señal de entrada neumática a señal de salida electrónica), un convertidor I/P (señal de entrada eléctrica a señal de salida neumática).

Conviene señalar que a veces se confunde convertidor con transductor. Este último término es general y no debe aplicarse a un aparato que convierta una señal de instrumentos.



(Cortesía de Eckardt)



(Cortesía de Masoneilan)

Fig. 2.8 Convertidores

Los receptores reciben las señales procedentes de los transmisores y las indican o registran. Los receptores controladores envían otra señal de salida normalizada a los valores ya indicados 3-15psi en señal neumática, o 4-20 mA c.c en señal electrónica, que actúa sobre el elemento final de control.

Los controladores (Fig. 2.9) compran la variable controlada (presión, nivel, temperatura) con un valor deseado y ejerce una acción correctiva de acuerdo con la desviación. La variable controlada la pueden recibir directamente, como controladores locales o bien indirectamente en forma de señal neumática, electrónica o digital procedente de un transmisor

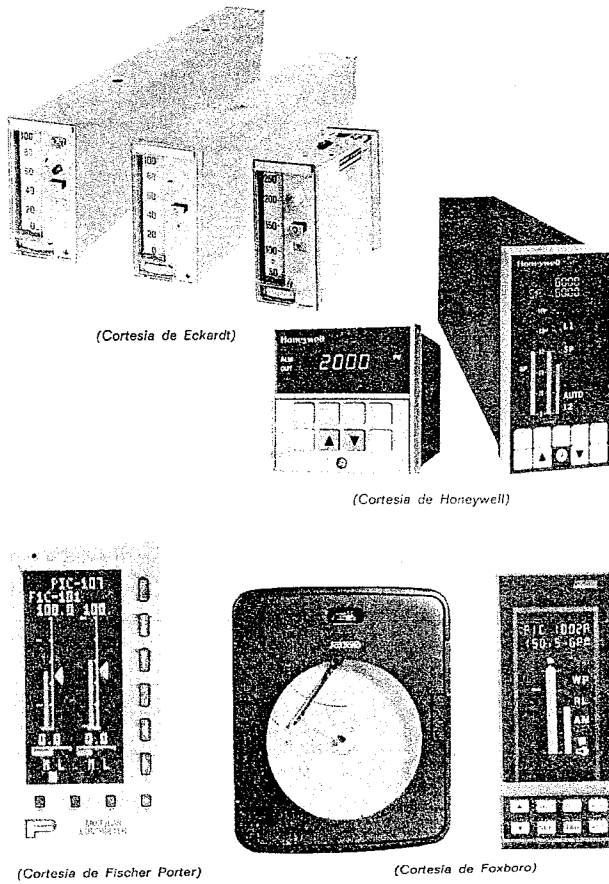
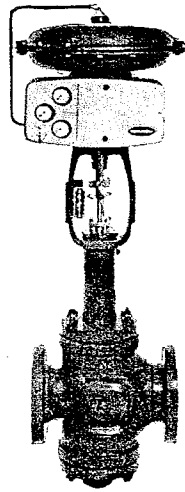


Fig. 2.9 Controladores

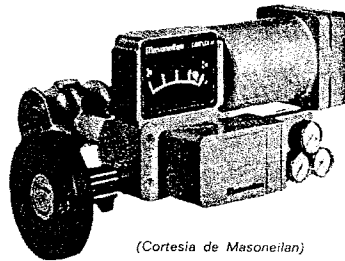
El elemento final de control (Fig. 2.10) recibe la señal del controlador y modifica el caudal del fluido o agente de control. En el control numérico, el elemento suele ser una válvula neumática o un servomotor neumático que efectúan su carrera completa de 3 a 15 psi (0,2-1 bar). En el control electrónico la válvula o el servomotor anteriores son accionados a través de un convertidor de intensidad a presión (I/P) o señal digital a presión que convierte la señal electrónica de 4 a 20 mA c.c. o digital a neumática 3 – 15 psi. En el control eléctrico el elemento suele ser una válvula motorizada que efectúa su carrera completa accionada por un servomotor eléctrico.



(Cortesía de Gulde)



(Cortesía de Masoneilan)



(Cortesía de Masoneilan)

Fig.2.10 Elemento final de control

En función de la variable de proceso.

De acuerdo con la variable del proceso, los instrumentos se dividen en instrumentos de caudal, nivel, presión, temperatura, densidad y peso específico, humedad y punto de rocío, viscosidad, posición velocidad pH, conductividad, frecuencia, fuerza, turbidez, etc.

Esta clasificación corresponde específicamente al tipo de las señales medidas siendo independiente del sistema empleado en la conversión de la señal de proceso. De este modo, un transmisor neumático de temperatura del tipo de bulbo y capilar, es un instrumento de temperatura a pesar de que la medida se efectúa convirtiendo las variaciones de presión del flujo que llena el bulbo y el capilar: el aparato receptor de la señal neumática del transmisor

anterior es un instrumento de temperatura, si bien al ser receptor neumático lo podríamos considerar como instrumento de presión, caudal, nivel o cualquier otra variable, según fuera la señal medida por el transmisor correspondiente; un registrador potenciométrico puede ser un instrumento de temperatura, de conductividad o de velocidad, según sean las señales medidas por los elementos primarios de termopar, electrodos o dinamo.

Así mismo, esta clasificación es independiente del número y tipo de transductores existentes entre el elemento primario y el instrumento final.

En la designación del instrumento se utiliza en el lenguaje común las dos clasificaciones expuestas anteriormente. Y de este modo, se consideran instrumentos tales como transmisores ciegos presión, controladores registradores de temperatura, receptores indicadores de nivel, receptores indicadores de nivel, receptores controladores registradores de caudal, etc.

En la figura 2.11 se pueden ver las clases de instrumentos

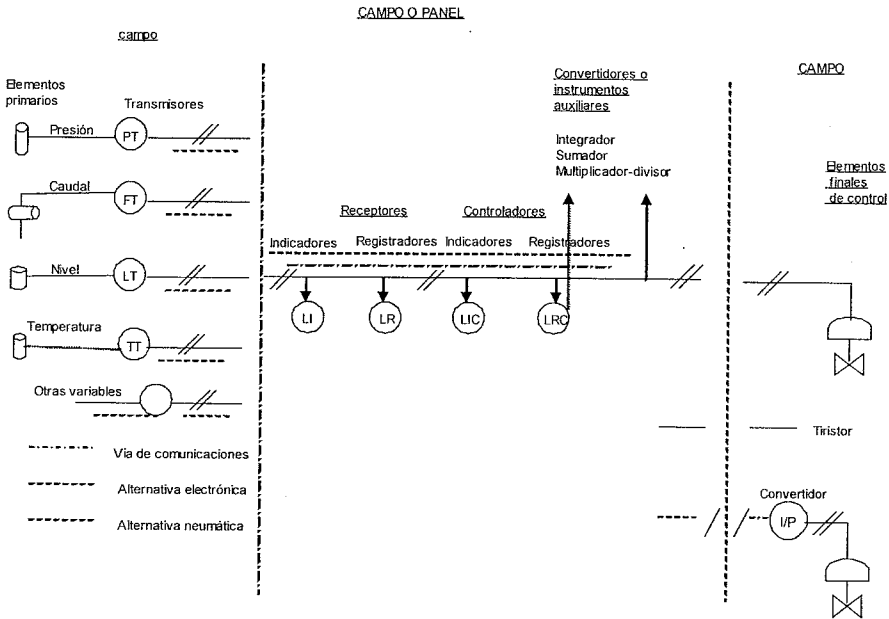


Fig. 2.11 Clases de instrumentos

Nótese que reconsideran instrumentos de campo y de panel; la primera designación incluye los instrumentos locales situados en el proceso o en sus proximidades (es decir, en tanques, tuberías, secadores, etc.) mientras que la segunda se refiere a los instrumentos montados en paneles, armarios o pupitres situados en salas aisladas o en zonas del proceso.

CODIGO DE IDENTIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS

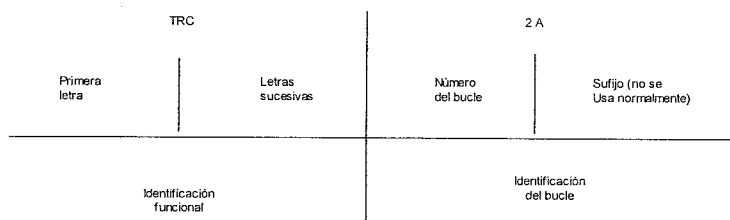
Para designar y representar los instrumentos de medición y control se emplean normas muy variadas que a veces varían de industria en industria. Esta gran variedad de normas y sistemas utilizados en las organizaciones industriales indica la necesidad universal de una normalización en este campo. Varias sociedades han dirigido sus esfuerzos en este sentido entre ellas se encuentra como una de las más importantes la Sociedad de Instrumentos de Estados Unidos ISA cuyas normas tienen por objeto establecer sistemas de designación (código y símbolos) de aplicación a las industrias químicas, petroquímicas, aire acondicionado, etc.

Figura a continuación un resumen de las normas ISA-S5.1 – 84 de ANSI/ISA del año 1984, ISA-S5.2 – 76 del año 1976 y la norma ISA-S5.3

Resumen Norma ISA S5.1-84

Generalidades

- A) Cada instrumento debe identificarse con sistema de letras que lo clasifique funcionalmente. Una identificación representativa es la siguiente:



- B) El número de letras funcionales para un instrumento debe ser mínimo, no excediendo de cuatro. Para ello conviene:
- Disponer las letras en subgrupos. Por ejemplo, un transmisor registrador de relación de caudales con un interruptor de alarma de relación de caudales puede identificarse con dos círculos uno con FFRT-3 y el otro FFS-3.
 - En un instrumento que indica y registra la misma variable medida puede omitirse la letra I (indicación).
 - Los bucles de instrumentos de un proyecto o sección de un proyecto deben identificarse con una secuencia única de números.
 - Si un bucle dado tiene más de un instrumento con la misma identificación funcional, es preferible añadir un sufijo, ejemplo FV-2^a, FV-2B, FV-2C, etc. O TE-25-1, TE-25-2, TE-25-3, etc. Estos sufijos pueden añadirse obedeciendo a las siguientes reglas:
 - Deben emplearse letras mayúsculas, A, B, C, etc.

2. En un instrumento tal como un registrador de temperatura multipunto que imprime números para identificación de los puntos, los elementos primarios pueden numerarse TE-25-1, TW-25-2, TE-25-3, etc.
 3. Las subdivisiones interiores de un bucle pueden dirigirse por sufijos formados por letras y números.
- e) Un instrumento que realiza dos o más funciones puede designarse por todas sus funciones. Por ejemplo, un registrador de caudal FR-2 con pluma de presión PR-4 se designa preferentemente FR-2/PR-4 o bien UR-7; un registrador de presión de dos plumas como PR-7/8; y una ventanilla de alarma para temperatura alta y baja como TAH/L-9.
 - f) Los accesorios para instrumentos tales como rotámetros de purga, filtros manorreductores potes de sello que no están representados experimentalmente en un diagrama de flujo, pero que necesitan una identificación para otros usos deben tenerla de acuerdo con su función y deben emplear el mismo número del bucle que el del instrumento asociado. Alternativamente, los accesorios pueden emplear el mismo número de identificación que el de sus instrumentos asociados, pero como palabras aclaratorias si ellos es necesario.

Por consiguiente, una brida para una placa- orificio FE-7 debe designarse como FX-7 o bien como FE-7 brida. Un rotámetro regulador de purga asociado como un manómetro PI-8 debe identificarse como FIVC-8, pero puede también marcarse PI-8 purga. Una sonda empleada con un termómetro TI-9 será TW-9, o bien, TI-9 sonda.

Letras de identificación

1.ª Letra		Letras Sucesivas		
Variable Medida (3)	Letra de modificación	Funcion de lectura pasiva	Funcion de salida	Letra de modificación
A	Análisis (4)	Alarma		
B	Llama (quemador)	Libre (1)	Libre (1)	Libre (1)
C	Conductividad		Control	
D	Densidad o peso específico	Diferencial (3)		
E	Tension (f.e.m.)	Elemento primario		
F	Caudal	Relacion (3)		
G	Calibre	Vidrio (8)		
H	Manual			Alto (6) (13)
I	Corriente Electrica			-14
J	Potencia	Indicacion (9) o indicador		
K	Tiempo	Exploracion (6)	Estacion de control	
L	Nivel	Luz piloto (10)		
M	Humedad			Medio o inter-medio (6) (13)
N	Libre (1)	Libre	Libre	Libre
O	Libre (1)	Oficio		
P	Presion o vacio	Punto de prueba		
Q	Cantidad	Integracion (3)		
R	Radiactividad	Registro		
S	Velocidad o frecuencia	Seguridad (7)	Interruptor	
T	Temperatura		Transmision o trasmisor	
U	Multivariable	Multifuncion	Multifuncion	Multifuncion
V	Viscosidad		Valvula	-11
W	Peso o fuerza	Vaina		
X	Sin clasificar (2)	Sin clasificar	Sin clasificar	Sin clasificar
Y	Libre (1)		Relé o computador (12)	
Z	Posicion		Elemento final de control sin clasificar	

Tabla 2.1

(1) Para cubrir las designaciones no normalizadas que pueden emplearse repetidamente en un proyecto se han previsto letras libres. Estas letras pueden tener un significado como primera letra y otro como letra sucesiva. Por ejemplo, la letra N puede representar como primera letra el módulo de elasticidad y como sucesiva un osciloscopio.

(2) La letra sin clasificar X, puede emplearse en las designaciones no indicadas que se utilicen sólo una vez o un número limitado de veces. Se recomienda que su significado figure en el exterior del círculo de identificación del instrumento. Ejemplo: XR-3 registrador de vibración.

(3) cualquier letra primera si se utiliza con las letras de modificación D (diferencial) F (relación) o Q (integración) o cualquier combinación de las mismas cambia su significado para representar una nueva variable medida. Por ejemplo, los instrumentos TDI y TI miden dos variables distintas, la temperatura diferencial y la temperatura, respectivamente

(4) La letra A para análisis, abarca todos los análisis no indicados en la tabla 2.1, que no están cubiertos por una letra libre. Es conveniente definir el tipo de análisis al lado del símbolo en el diagrama de proceso.

(5) El empleo de la letra U como multivariable en lugar de una combinación de primeras letras es opcional.

(6) El empleo de los términos de modificación alto, medio, bajo, medio o intermedio y exploración, es preferible pero opcional.

(7) El término seguridad, debe aplicarse sólo a elementos primarios y a elementos finales de control que protejan contra condiciones de emergencia (peligrosas para el equipo o el personal). Por este motivo una válvula autorreguladora de presión que regula la presión de salida de un sistema, mediante el alivio o escape de fluido al exterior, debe ser PCV, pero si esta misma válvula se emplea contra condiciones de emergencia, se designa PSV. La designación PSV se aplica a todas las válvulas proyectadas para proteger contra condiciones de emergencia de presión sin tener en cuenta si las características de la válvula y la forma de trabajo la colocan en la categoría de válvula de seguridad, válvula de alivio, o válvula de seguridad de alivio.

(8) La letra de función pasiva vidrio, se aplica a los instrumentos que proporcionan una visión directa no calibrada del proceso.

(9) La letra indicación se refiere a la lectura de una medida real de proceso. No se aplica a la escala de ajuste manual de la variable si no hay indicación de ésta.

(10) Una luz piloto que es parte de un bucle de control debe designarse por una primera letra seguida de la letra sucesiva L. Por ejemplo, una luz piloto que indica un periodo de tiempo terminado se designará KL. Sin embargo si se desea identificar una luz piloto fuera del bucle de control, la luz piloto puede designarse en la misma forma o bien alternativamente por una letra única L. Por ejemplo, una luz piloto de marcha de un motor eléctrico puede identificarse El, suponiendo que la variable medida adecuada es la tensión, o bien XL, suponiendo que la luz es excitada por los contactos eléctricos auxiliares del arrancador del motor, o bien simplemente L.

La actuación de la luz piloto puede ser acompañada por una señal audible.

(11) El empleo de la letra U como multifunción en lugar de una combinación de otras letras, es opcional.

(12) Se supone que las funciones asociadas con el uso de la letra sucesiva Y se definirá en el exterior del símbolo del instrumento cuando sea conveniente hacerlo así.

(13) Los términos alto bajo y medio o intermedio deben corresponder a valores de la variable medida, no a los de la señal a menos que se indique de otro modo. Por ejemplo, una alarma de nivel alto deriva de una señal de un transmisor de nivel de acción inversa debe designarse LAH incluso aunque la alarma sea actuada cuando la señal cae a un valor bajo.

(14) Los términos alto y bajo, cuando se aplican a válvulas, o a otros dispositivos de cierre-apertura, se definen como sigue:

Alto: indica que la válvula está, o se aproxima a la posición de apertura completa.

Bajo: denota que se acerca o esta en la posición completamente cerrada

Figuran a continuación los símbolos a emplear en los planos y dibujos de representación de instrumentos en los procesos industriales Fig. 2.12.

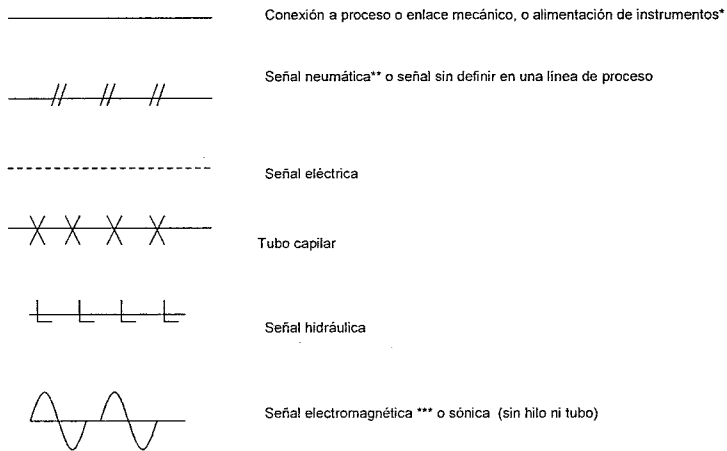


Fig. 2.12

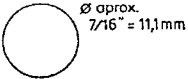


* Se sugieren las siguientes abreviaturas para representar el tipo de alimentación (o bien de purga de fluidos)



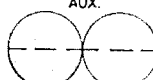
- AS Alimentación de aire
- ES Alimentación eléctrica
- HS Alimentación de gas
- NS Alimentación de nitrógeno
- SS Alimentación de vapor
- WS Alimentación de agua

** El símbolo se aplica también a cualquier señal que emplee gas como medio de transmisión. Si se emplea un gas distinto de aire debe identificarse con una nota al lado del símbolo o bien de otro modo.



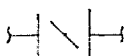
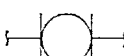
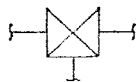
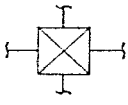
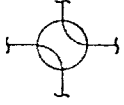
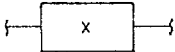
*** Los fenómenos electromagnéticos incluyen calor, ondas de radio radiación nuclear y luz.

Símbolos generales



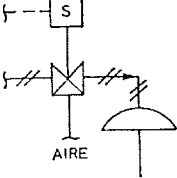
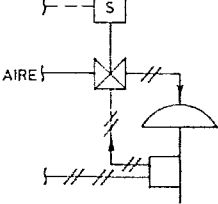
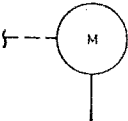
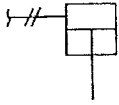
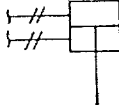
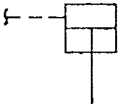

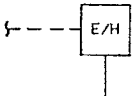
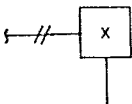
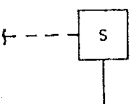

 <p>LOCAL</p>	 <p>MONTAJE EN PANEL 1</p>	 <p>MONTAJE DETRAS DEL PANEL</p>	
<p>INSTRUMENTO PARA UNA VARIABLE MEDIDA CON CUALQUIER NÚMERO DE FUNCIONES</p>			

 <p>MONTAJE LOCAL</p>	 <p>MONTAJE EN PANEL</p>	 <p>MONTAJE DETRAS DE PANEL AUXILIAR</p>	
<p>INSTRUMENTO PARA DOS VARIABLES MEDIDAS. OPCIONALMENTE INSTRUMENTO CON MAS DE UNA FUNCION. PUEDEN AÑADIRSE CIRCULOS ADICIONALES SI SE PRECISAN</p>			

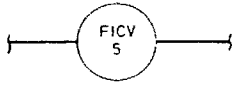
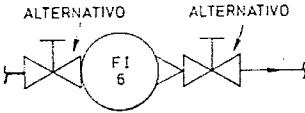
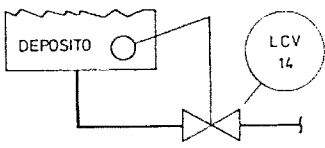
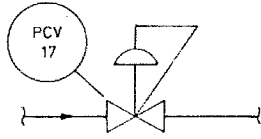
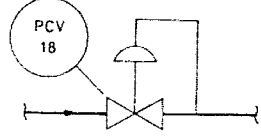
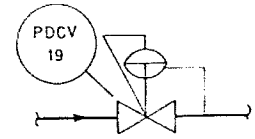
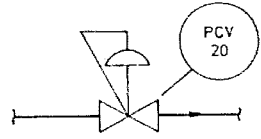
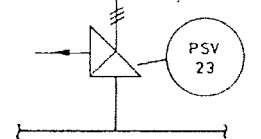
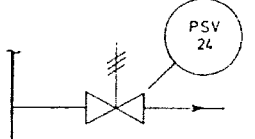
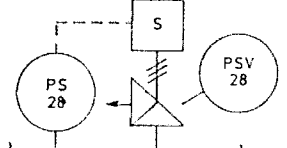
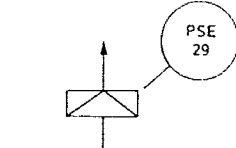
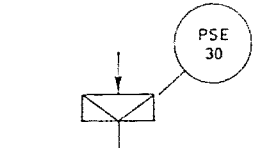
Símbolos para válvulas de control

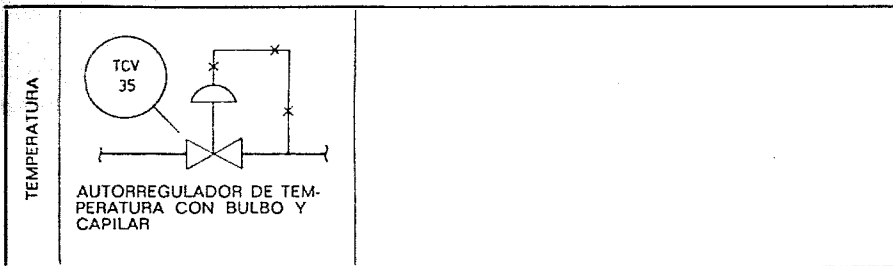
 <p>GLOBO, COMPUERTA U OTRA</p>	 <p>ANGULO</p>	 <p>MARIPOSA, PERSIANA O COMPUERTA</p>	 <p>OBTURADOR ROTATIVO O VÁLVULA DE BOLA</p>
 <p>TRES VIAS</p>	 <p>ALTERNATIVA 1</p>  <p>ALTERNATIVA 2</p> <p>CUATRO VIAS</p>		
 <p>SIN CLASIFICAR</p>			

Símbolos para actuadores

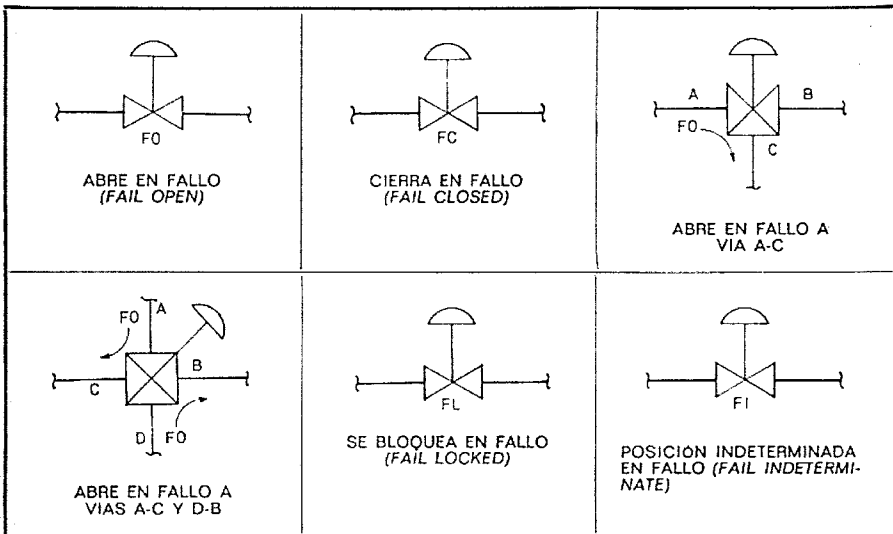
 <p>SIN POSICIONADOR</p>	 <p>PREFERIDA PARA DIAFRAGMA CON PILOTO (POSICIONADOR VALVULA SOLENOIDE, ...)</p>	 <p>AIRE</p> <p>PREFERIDO</p>	 <p>AIRE</p> <p>OPCIONAL</p>
<p>DIAFRAGMA CON MUELLE</p>		<p>DIAFRAGMA CON MUELLE, POSICIONADOR Y VALVULA PILOTO QUE PRESURIZA EL DIAFRAGMA AL ACTUAR</p>	
 <p>MOTOR ROTATIVO</p>	 <p>SIMPLE ACCIÓN</p>		 <p>DOBLE ACCIÓN</p>
<p>CILINDRO SIN POSICIONADOR U OTRO PILOTO</p>			
 <p>PREFERIDO PARA CUALQUIER CILINDRO</p>	 <p>ACTUADOR MANUAL</p>	 <p>ELECTROHIDRAULICO</p>	
 <p>SIN CLASIFICAR</p>	 <p>SOLENOIDE</p>	 <p>PARA VALVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD (DENOTA UN MUELLE, PESO, O PILOTO INTEGRAL)</p>	

Autorreguladores

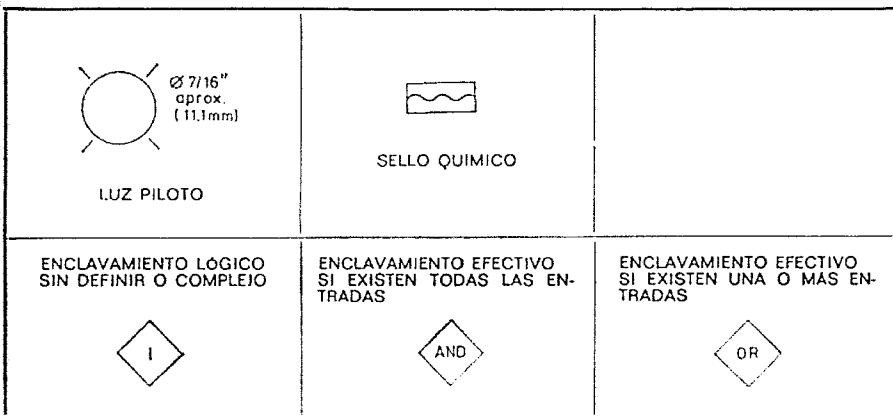
<p>CAUDAL</p>	 <p>REGULADOR AUTOMÁTICO CON INDICACIÓN INTEGRAL DEL CAUDAL</p>	 <p>ROTAMETRO INDICADOR CON VALVULA MANUAL DE REGULACIÓN</p>	
<p>NIVEL</p>	 <p>CONTROLADOR DE NIVEL CON ENLACE MECÁNICO</p>		
<p>PRESIÓN</p>	 <p>AUTORREGULADOR DE PRESIÓN CON TOMA INTERIOR</p>	 <p>AUTORREGULADOR DE PRESIÓN CON TOMA EXTERIOR</p>	 <p>REGULADOR REDUCTOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL CON TOMAS INTERIOR Y EXTERIOR</p>
<p>PRESIÓN</p>	 <p>AUTORREGULADOR DE PRESIÓN POSTERIOR CON TOMA INTERIOR</p>	 <p>VALVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD DE ÁNGULO</p>	 <p>VALVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD DE PASO RECTO</p>
<p>PRESIÓN</p>	 <p>VALVULA DE ALIVIO O DE SEGURIDAD DE ÁNGULO DISPARADA POR SOLENOIDE</p>	 <p>DISCO DE RUPTURA PARA PRESIÓN</p>	 <p>DISCO DE RUPTURA PARA VACÍO</p>



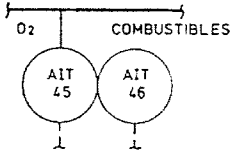
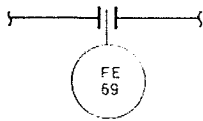
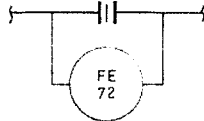
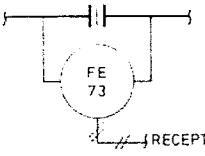
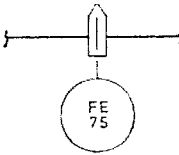
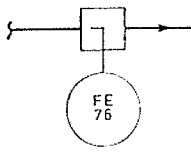
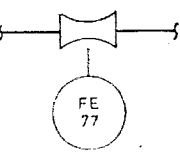
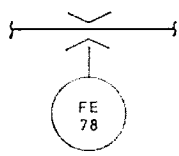
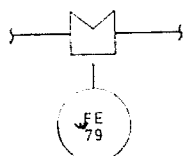
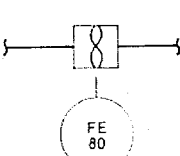
Acción del actuador en caso de fallo de aire (o de potencia)

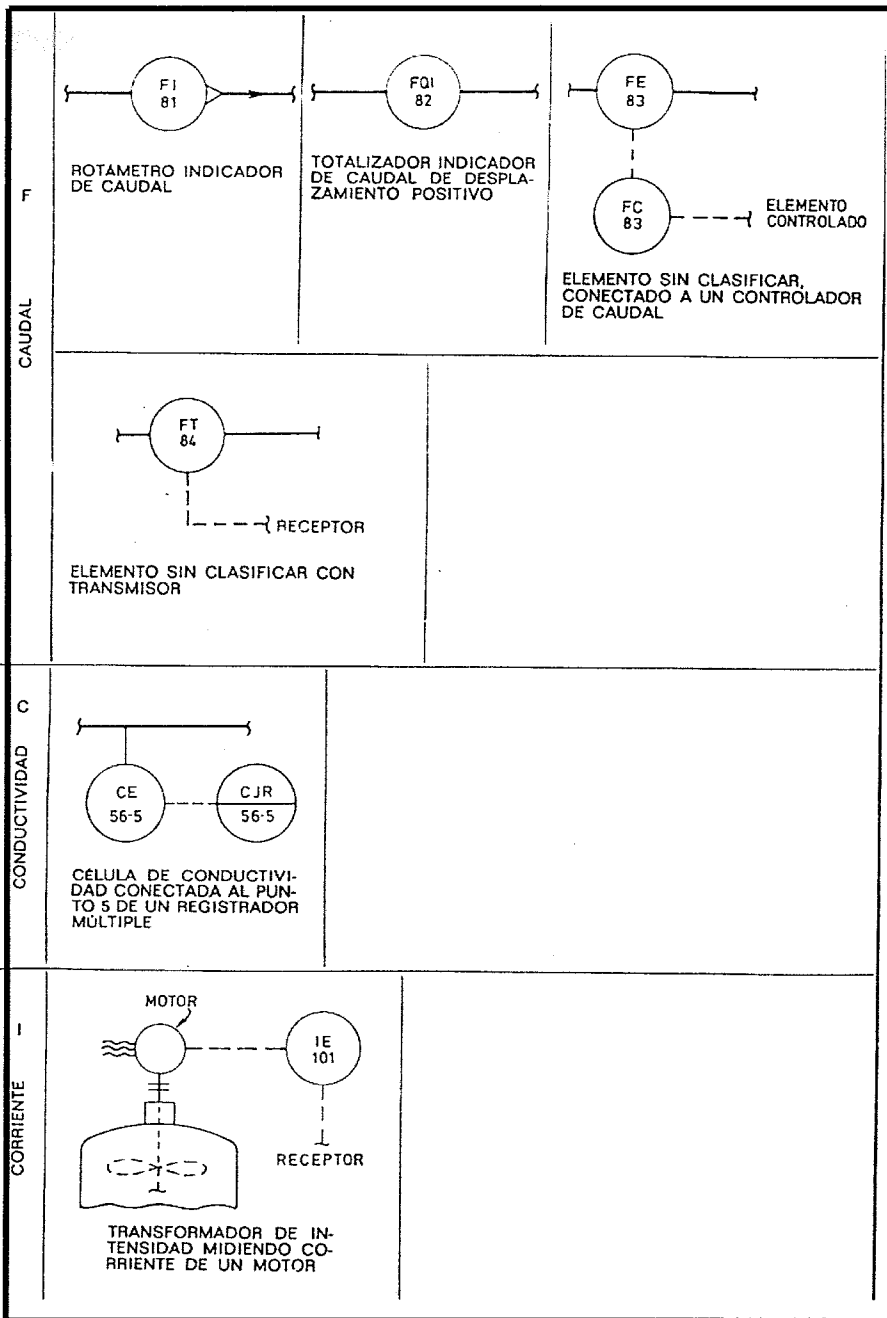


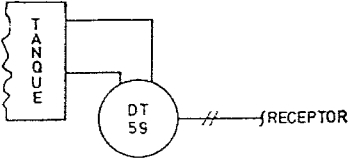
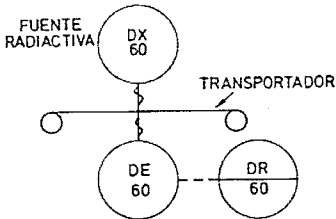
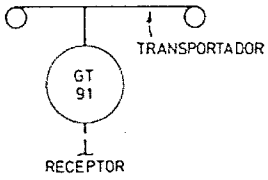
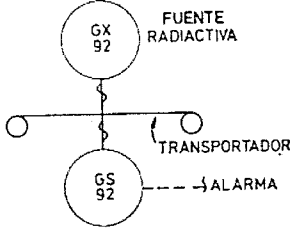
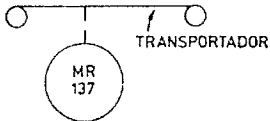
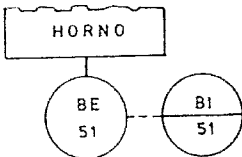
Símbolos varios

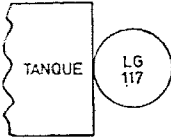
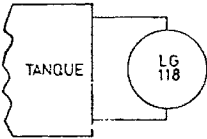
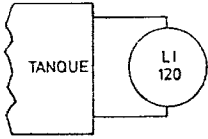
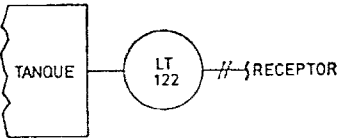
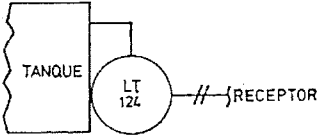
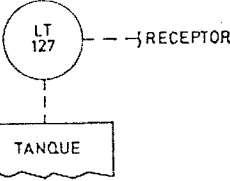
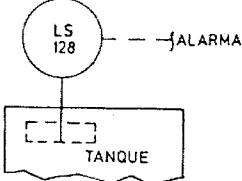
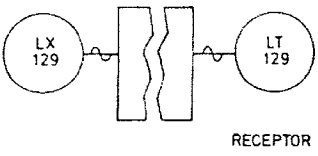
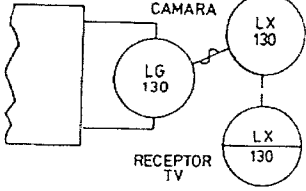
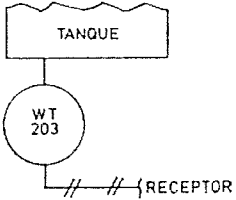
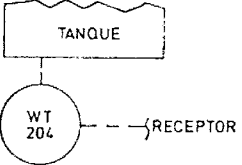


Elementos primarios

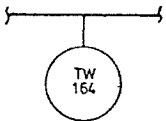
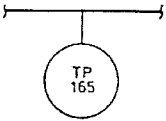
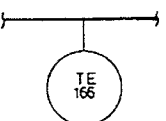
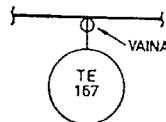
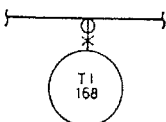
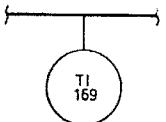
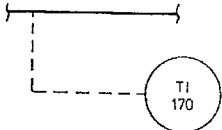
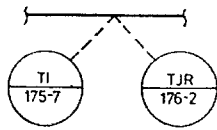
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">ANALISIS</p>	 <p>RECEPTOR RECEPTOR</p> <p>ANALISIS DOBLE DE OXI-GENO Y COMBUSTIBLE</p>		
	 <p>PLACA-ORIFICIO CON TOMAS EN LA BRIDA O EN LA CAMARA ANULAR</p>	 <p>PLACA-ORIFICIO CON TOMAS EN LA VENA CONTRAIDA, RADIALES O EN LA TUBERIA</p>	 <p>RECEPTOR</p> <p>PLACA-ORIFICIO CONECTADA A UN TRANSMISOR DE PRESION DIFERENCIAL</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">CAUDAL</p>	 <p>PLACA-ORIFICIO CON ACCESORIO DE CAMBIO RAPIDO</p>	 <p>TUBO PITOT O TUBO VENTURI-PITOT</p>	 <p>TUBO VENTURI O TOBERA</p>
	 <p>CANAL MEDIDOR</p>	 <p>VERTEDERO</p>	 <p>ELEMENTO DE TURBINA</p>



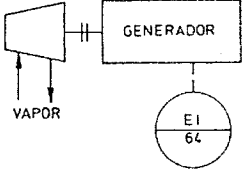

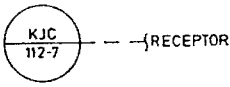
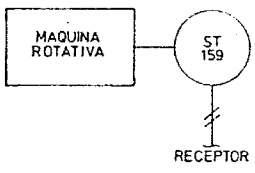
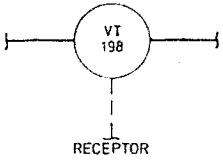
<p>D</p> <p>DENSIDAD O PESO ESPECIFICO</p>	 <p>TRANSMISOR DE DENSIDAD DE PRESIÓN DIFERENCIAL</p>	 <p>ELEMENTO RADIATIVO DE DENSIDAD CONECTADO A UN REGISTRADOR EN PANEL</p>
<p>C</p> <p>ESPESOR</p>	 <p>TRANSMISOR DE RODILLO</p>	 <p>INTERRUPTOR DE ESPESOR RADIATIVO</p>
<p>M</p> <p>HUMEDAD</p>	 <p>REGISTRADOR DE HUMEDAD</p>	
<p>B</p> <p>LLAMA</p>	 <p>DETECTOR DE LLAMA CONECTADO A UN INDICADOR DE INTENSIDAD DE LLAMA</p>	

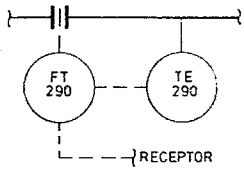
	 <p>TANQUE LG 117</p> <p>NIVEL DE VIDRIO INTEGRAL CON EL TANQUE</p>	 <p>TANQUE LG 118</p> <p>NIVEL DE VIDRIO DE CO- NEXION EXTERNA</p>	 <p>TANQUE LI 120</p> <p>INDICADOR DE NIVEL DE FLOTADOR O DE DESPLA- ZAMIENTO</p>	
L NIVEL	 <p>TANQUE LT 122 RECEPTOR</p> <p>TRANSMISOR DE NIVEL DE FLOTADOR O DESPLAZAMIENTO MONTADO EN EL EXTE- RIOR DEL TANQUE</p>	 <p>TANQUE LT 124 RECEPTOR</p> <p>TRANSMISOR DE NIVEL DE PRESION DI- FERENCIAL MONTADO EN EL TANQUE</p>		
	 <p>LT 127 RECEPTOR</p> <p>TANQUE</p> <p>ELEMENTO DE NIVEL DE CAPACIDAD CONECTADO A UN TRANSMISOR DE NIVEL</p>	 <p>LS 128 ALARMA</p> <p>TANQUE</p> <p>INTERRUPTOR DE NIVEL DE SÓLIDOS DE PALETAS</p>		
	 <p>LX 129 LT 129</p> <p>RECEPTOR</p> <p>TRANSMISOR DE NIVEL RADIATIVO O SONICO</p>	 <p>CAMARA LG 130 LX 130</p> <p>RECEPTOR LX 130 TV</p> <p>VISION REMOTA DE UN NIVEL DE VIDRIO MEDIANTE CAMARA DE TELEVISION</p>		
W PESO O FUERZA	 <p>TANQUE WT 203</p> <p>RECEPTOR</p> <p>TRANSMISOR DE PESO DE CONEXION DIRECTA</p>	 <p>TANQUE WT 204</p> <p>RECEPTOR</p> <p>GALGA EXTENSOMETRICA CONECTADA A UN TRANSMISOR DE PESO</p>		

<p>Z</p> <p>POSICIÓN</p>	<p>INTERRUPTOR DE FIN DE CARRERA ACCIONADO CUANDO LA VALVULA CIERRA A UNA POSICION PREDETERMINADA</p>	
<p>J</p> <p>POTENCIA</p>	<p>VATIMETRO CONECTADO AL MOTOR DE UNA BOMBA</p>	
<p>P</p> <p>PRESION O VACIO</p>	<p>MANOMETRO</p>	<p>CON LINEA DE PRESION</p> <p>MONTAJE EN LINEA</p> <p>MANOMETRO CON SELLO</p>
<p>PRESION O VACIO</p>	<p>RECEPTOR</p> <p>ELEMENTO DE PRESION DE GALGA EXTENSOMETRICA CONECTADO A UN TRANSMISOR INDICADOR DE PRESION</p>	
<p>R</p> <p>RADIATIVIDAD</p>	<p>INDICADOR DE RADIATIVIDAD</p>	

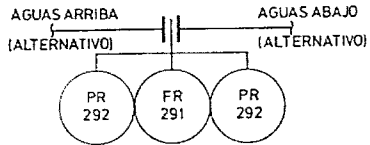
	 <p>CONEXIÓN DE ENSAYO DE TEMPERATURA CON VAINA</p>	 <p>CONEXIÓN DE ENSAYO DE TEMPERATURA SIN VAINA</p>	 <p>ELEMENTO DE TEMPERATURA SIN VAINA</p>
TEMPERATURA	 <p>ELEMENTO DE TEMPERATURA CON VAINA</p>	 <p>INDICADOR DE TEMPERATURA DE BULBO Y CAPILAR CON VAINA</p>	 <p>TERMOMETRO BIMETALICO O DE VIDRIO U OTRO LOCAL</p>
	 <p>INDICADOR DE TEMPERATURA DE TERMOPAR O DE SONDA DE RESISTENCIA</p>		
	 <p>TERMOPAR DOBLE CONECTADO A UN INDICADOR Y UN REGISTRADOR MULTIPLE DE TEMPERATURA</p>		

Sistemas varios

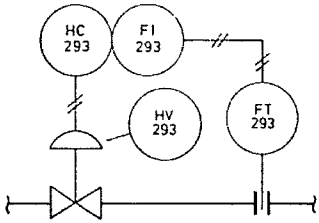
<p>E TENSION</p>	 <p>VOLTIMETRO INDICADOR CONECTADO A UN GENERADOR DE TURBINA</p>	
<p>K TIEMPO O PROGRAMADOR</p>	 <p>RELOJ</p>	 <p>PUNTO 7. PROGRAMADOR MULTIPUNTO. TODO-NADA</p>
<p>S VELOCIDAD O FRECUENCIA</p>	 <p>TRANSMISOR DE VELOCIDAD</p>	
<p>V VISCOSIDAD</p>	 <p>TRANSMISOR DE VISCOSIDAD</p>	



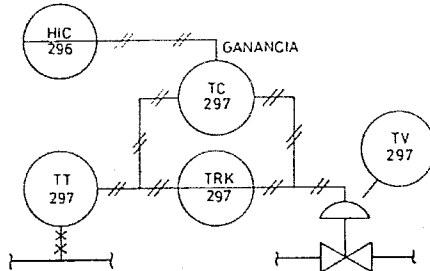
TRANSMISOR DE CAUDAL CON ELEMENTO DE TEMPERATURA DE COMPENSACION



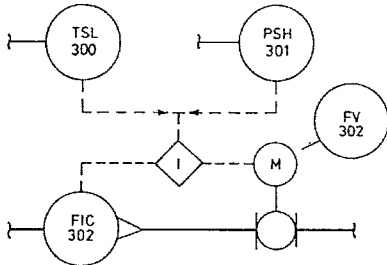
REGISTRADOR DE CAUDAL CON TOMA DE PRESION



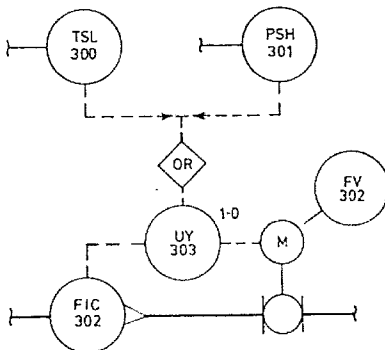
ESTACION DE MANDO MANUAL SIN MANOMETRO DE SALIDA Y CON INDICADOR RECEPTOR DE CAUDAL



REGISTRADOR CONTROLADOR LOCAL DE TEMPERATURA CON AJUSTE MANUAL REMOTO DE GANANCIA



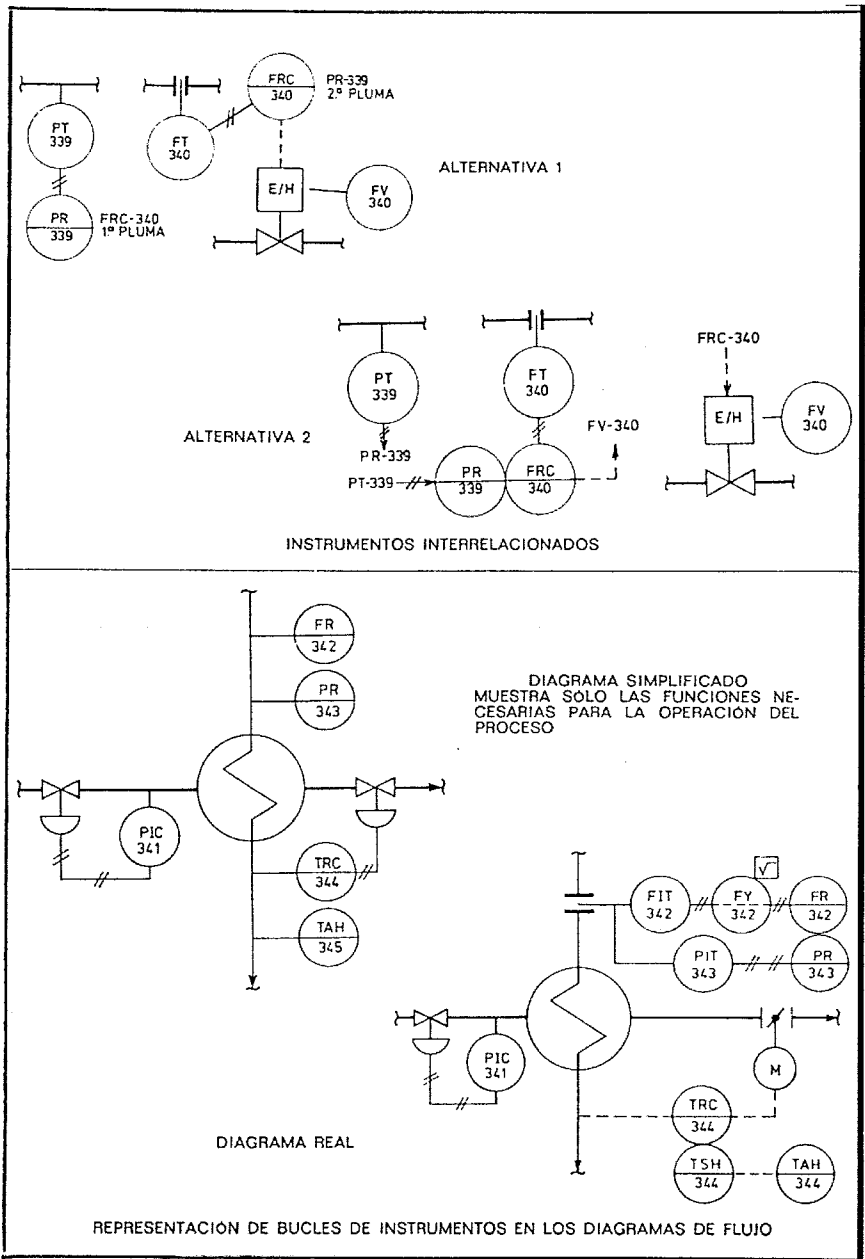
UTILIZADO SI EL ENCLAVAMIENTO LOGICO ES INDEFINIDO O COMPLEJO



OPCIONAL

UTILIZADO SI DESEA MOSTRARSE EL RELE UY-303. "OR" DEBE OMITIRSE SI EL ENCLAVAMIENTO LOGICO ES INDEFINIDO O COMPLEJO

CONTROL DE CAUDAL ENCLAVADO CON TERMOSTATO DE BAJA TEMPERATURA O PRESOSTATO DE ALTA PRESION



Resumen Norma ISA S5.2-76

Esta norma lista los símbolos lógicos que representan operaciones de proceso binarias realizadas por cualquier clase de hardware, sea eléctrico, neumático, hidráulico u otro.

La existencia de una señal lógica puede corresponder físicamente a la existencia o no de una señal de instrumentos, dependiendo del tipo particular del sistema de hardware y de la filosofía del diseño del circuito. Por ejemplo, el proyectista puede diseñar una alarma de alto caudal para que sea accionada por un interruptor eléctrico en el que los contactos abran, o bien cierren, causando el caudal es alto. Por lo tanto, la condición d caudal alto puede ser representada físicamente por la ausencia de una señal eléctrica.

El flujo de información está representado por líneas que interconectan estas dos lógicos.

La dirección normal del flujo es de izquierda a derecha o de arriba abajo. Para mayor claridad del diagrama, y siempre que sea necesario, pueden añadirse flechas a las líneas de flujo.

Es posible que una condición lógica específica no sea comprendida cuando trate a un aparato con dos estados alternativos específicos. Por ejemplo, si una válvula no está cerrada, puede ser debido a que la válvula está totalmente abierta, o bien a que la válvula no está cerrada y está en posición intermedia entre casi cerrada y totalmente abierta. La interpretación lineal del diagrama indica que la segunda posibilidad es la correcta.

En las válvulas todo-nada el diagrama debe especificar exactamente lo proyectado. De este modo, si la válvula debe estar abierta, así debe establecerse; no debe indicarse que la válvula está no cerrada.

En contraste, un dispositivo tal como una bomba accionada por un motor, siempre está funcionando o parada salvo algunas situaciones especiales. El señalar que una bomba no está en funcionamiento significa que está parada.

Las siguientes definiciones se aplican a los aparatos que tienen posiciones abiertas, cerradas o intermedias:

Posición abierta: Posición que está 100% abierta.

Posición no abierta: Posición que es menor de 100% abierta.

Posición no cerrada: Una posición que es mayor que 0% abierta.

Posición intermedia: Una posición específica que es mayor que 0% y menor de 100% abierta.

Posición no intermedia: Una posición especificada que es superior o inferior a la posición intermedia especificada.

En un sistema lógico que tenga un estado de entrada derivado de modo inferencial o indirecto, puede presentarse una condición que conduzca a una conclusión errónea. Por ejemplo, la suposición de que existe caudal si una bomba está excitada, puede ser falsa porque una válvula puede estar cerrada, o porque el eje de la bomba esté roto o por otra causa.

La pérdida de alimentación eléctrica neumática u otra a memorias o a otros elementos lógicos, puede afectar la operación del proceso, por lo que la fuente de alimentación o su pérdida debe entrarse como entrada lógica al sistema o a los elementos lógicos individuales. En las memorias, la fuente de alimentación puede entrarse como una entrada lógica o en forma indicada en los diagramas. También puede ser necesario mostrar el efecto de la restauración de la alimentación.

En las tablas se presentan y definen los símbolos lógicos; los símbolos con tres entradas A, B, y C son típicos de funciones lógicas con cualquier número de dos o más entradas. En las

tablas de verdad, 0 indica la no existencia de la entrada lógica de la señal de salida o el estado de entrada lógica. D indica la existencia de la señal o estado de salida lógica como resultado de las entradas lógicas apropiadas.

Tabla de símbolos lógicos

Función	Símbolo	Definición y tabla de verdad	Ejemplo
ENTRADA (INPUT)	(Entrada) \vdash Puede ser precedida por el símbolo del instrumento	Entrada secuencia lógica	Arranque manual de la inyección \vdash
SALIDA (OUTPUT)	(Salida) \vdash Puede ser seguida por el símbolo del instrumento	Salida secuencia lógica	Paro extracción \vdash
Y (AND)		D sólo existe mientras estén presentes A, B y C	La bomba está en marcha si el nivel es alto y la válvula de descarga está abierta
O (OR)		D sólo existe mientras esté presente una o más entradas A, B y C	Paro del compresor si la presión del agua de refrigeración es baja o si la temperatura de los rodamientos es alta
O CUALIFICADA	 * Insertar número de entradas	D sólo existe mientras estén presentes un número especificado de entradas A, B y C	Alimentador en marcha mientras dos y sólo dos molinos funcionen
NO (NOT)		B sólo existe mientras la entrada A no existe	Cerrar válvula sólo mientras la presión no es alta
MEMORIA DE FLIP-FLOP	 * Si la salida D no existe no debe mostrarse	S indica implantar memoria y R restaurar memoria La salida C existe tan pronto A existe, y continúa existiendo, independientemente del estado de A, hasta el reset de la memoria, es decir, termina ante la existencia de B, C permanece terminado, independientemente del estado de B, hasta que A implanta la memoria Si se emplea la salida D, ésta existe si C no existe, y D no existe cuando C existe La pérdida de alimentación se representa añadiendo la letra S	Si se inicia la operación de la bomba de reserva, ésta debe ponerse en marcha aunque falte la alimentación del circuito lógico, hasta que termina la secuencia del proceso. La bomba debe estar en marcha si existen simultáneamente los mandatos START y STOP

Función	Símbolo	Definición y tabla de verdad	Ejemplo
---------	---------	------------------------------	---------

Símbolo modificado	Acción requerida de la memoria ante fallos de la alimentación
LS	Pérdida de memoria
MS	Memoria mantenida
NS	No significativo, sin preferencia

ELEMENTO DE TIEMPO

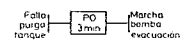


• Insertar símbolo

Método básico

Símbolo	Significado
DJ	Retarda la iniciación de la salida. La existencia continua de A durante un tiempo especificado causa la existencia de B cuando el tiempo expira. B termina cuando A termina
DT	Retarda la terminación de la salida. La existencia de A causa la existencia inmediata de la salida B. B termina cuando A ha terminado y no ha existido durante un tiempo especificado
PO	Impulso de salida. La existencia de A causa la existencia inmediata de B; B existe durante un tiempo especificado, independientemente del estado de A, y a continuación, termina

Si falla la purga del tanque, aunque sea momentáneamente, operar la bomba de evacuación durante 3 minutos y a continuación pararla

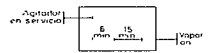


Método general

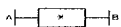


Existencia estado lógico de entrada
 No existe estado lógico de entrada
 Existencia estado lógico de salida
 No existe estado lógico de salida

El vapor se conecta durante 15 minutos empezando 6 minutos después que ha parado el agitador, excepto que el vapor debe ser desconectado si el agitador reanuncia



ESPECIAL



• Insertar requerimientos lógicos especiales

La salida B existe con una relación lógica a la entrada A del modo establecido en requerimientos especiales

En la tabla que aparece en las páginas anteriores se representan y definen los símbolos lógicos; los símbolos con tres entradas A, B y C son típicos de funciones lógicas con cualquier número de dos o más entradas. En las tablas de verdad, 0 indica la no existencia de la entrada lógica o de la señal de salida o el estado dado en la cabecera de la columna. 1 indica la existencia de la señal o estado de entrada lógica. D indica la existencia de la señal o estado de salida lógica como resultado de las entradas lógicas apropiadas.

Resumen Norma ISA-S5.3

El objeto de esta norma es documentar los instrumentos formados por ordenadores, controladores programables, miniordenadores y sistemas a microprocesador que disponen de control compartido, visualización compartida y otras características de interfase. Los símbolos representan la interfase con los equipos anteriores de la instrumentación de campo, de la instrumentación de la sala de control y de otros tipos de hardware.

El tamaño de los símbolos debe ser conforme a la norma ISA-S5.1-84, a la que complementa.

Símbolos de visualización del control distribuido/compartido

1. Accesible normalmente al operador-indicador/controlador/registrador o punto de alarma.



- (1) Visualización compartida.
- (2) Visualización y control compartidos.
- (3) Acceso limitado a la red de comunicaciones.
- (4) Interfase del operador en la red de comunicaciones.

2. Dispositivo de interfase auxiliar del operador.



- (1) Montado en panel; carátula analógica; no está montado normalmente en la consola principal del operador.
- (2) Controlador de reserva o estación manual.
- (3) El acceso puede estar limitado a la red de comunicaciones.
- (4) Interfase del operador vía la red de comunicaciones.

3. No accesible normalmente al operador.



- (1) Controlador ciego compartido.
- (2) Visualización compartida instalada en campo.
- (3) Cálculo, acondicionamiento de señal en controlador compartido.
- (4) Puede estar en la red de comunicaciones.
- (5) Normalmente operación ciega.
- (6) Puede ser alterado por la configuración.

Símbolos del ordenador

A utilizar cuando los sistemas incluyen componentes identificadores como ordenadores, diferentes de un procesador integral que excita las varias funciones de un sistema de control distribuido. El componente ordenador puede ser integrado e el sistema, vía la red de datos, o puede ser un ordenador aislado.



4. Normalmente accesible al operador-indicador/controlador/registrador o punto de alarma. Utilizado usualmente para indicar la pantalla de video.

5. Normalmente no accesible para el operador.



- (1) Interfase entrada/salida.
- (2) Calculo / acondicionamiento de señal dentro de un ordenador.
- (3) Puede usarse como controlador ciego o como modulo de calculo de software.

Símbolos de control lógico y secuencial

6. Símbolo general. Para complejos no definidos interconectando control lógico o secuencial (ver ISA-S5.1-84).



7. Control distribuido interconectando controladores lógico con funciones lógicas binarias o secuenciales.



- (1) Paquete de controlador lógico programable o controladores lógicos digitales integrales con el equipo de control distribuido.
- (2) No accesible normalmente al operador.

8. Control distribuido interconectando un controlador lógico con funciones lógicas binarias o secuenciales.



- (1) Paquete de controlador lógico programable o controladores lógicos digitales integrales con el equipo de control distribuido.
- (2) Accesible normalmente al operador.

Símbolos de funciones internas del sistema

9. Cálculo/acondicionamiento de señal.

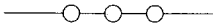


- (1) Para identificación de bloques consulte ISA-S5.1-84 tabla 2 <<Designaciones de funciones para relés>>.
- (2) Para requerimientos de cálculo amplios, use la designación <<C>>. Escriba aclaraciones en documentación suplementaria.
- (3) Utilizado en combinación con válvulas de alivio según ISA-S5.1-84.

Símbolos comunes

10. Red del sistema.

- (1) Usado para indicar una red de software, o conexiones entre fundones suministradas en el sistema del fabricante.



- (2) Alternativamente, la red puede ser mostrada implícitamente por símbolos contiguos.
- (3) Puede utilizarse para indicar una red de comunicaciones a opción del usuario.

Registradores y otros sistemas de retención de datos históricos

Los registradores convencionales, tales como los de gráfico de banda se mostrarán de acuerdo con ISA-S5.1-84.

En los registradores asignables utilice el símbolo 1.

El almacenamiento en masa de largo plazo de una variable de proceso mediante memorias digitales como cinta, disco, etc., debe representarse de acuerdo con los símbolos de visualización de control distribuido/compartido o símbolos de ordenador de esta norma, dependiendo de la localización del aparato.

Identificación

Los códigos de identificación de esta norma deben cumplir con ISA-S5.1-84 con las siguientes adiciones.

Alarmas de software

Las alarmas de software pueden ser identificadas situando letras de designación de la tabla 1.1 de ISA-S5.1-84 en las líneas de señal de entrada o de salida de los controladores, o de otro componente específico integral del sistema.

Contigüidad de los símbolos

Pueden unirse dos o más símbolos para expresar los significados siguientes, además de los mostrados en ISA-S5.1-84:

1. Comunicación entre los instrumentos asociados, por ejemplo, hilos de conexión, redes internas del sistema, reserva.
2. Instrumentos integrados con funciones múltiples, por ejemplo, registrador multipunto, válvula de control con controlador incorporado.

La aplicación de símbolos contiguos es una opción del usuario. Si su aplicación no es absolutamente clara, los símbolos contiguos no deben utilizarse.

Alarmas

Generalidades

Todos los aparatos y alarmas cableados, distintos d los aparatos y alarmas cubiertos específicamente por esta norma, deben estar de acuerdo con ISA-S5.1-84 tabla 1.1.

Alarmas de sistemas de instrumentos

Las alarmas cubiertas por esta norma deben identificarse de acuerdo con las figuras:

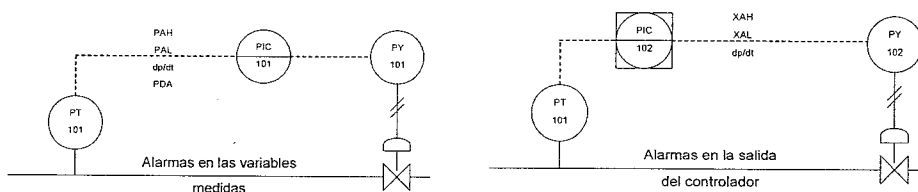
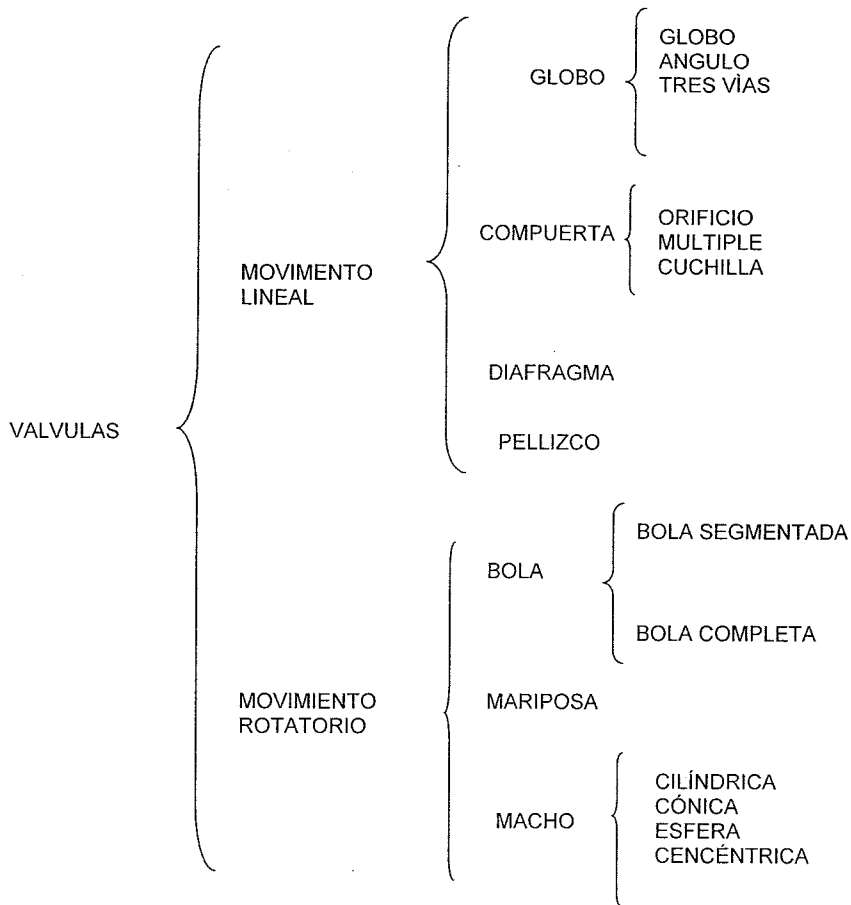


Fig. 2.13

2.7 ELEMENTOS FINALES DE CONTROL

En el lazo cerrado de control, el elemento final de control es generalmente, la válvula de control, que recibe la salida del controlador y ejecuta la corrección al proceso.

Las válvulas son dispositivos mecánicos o eléctricos que actúan con rapidez en forma continua. Los tipos de válvulas de control que se usan más frecuentemente son:



Las válvulas de globo constan de las siguientes partes:

- Actuador
- Yugo
- Bonete
- Cuerpo

El funcionamiento de las válvulas de globo es en un eje vertical. Sus características de flujo pueden ser:

- Lineal
- Igual porcentaje
- Apertura rápida

Estas se producen por la acción de los tapones de la válvula.

Las válvulas de control operan con una señal neumática de 3 a 15 PSIG o 6 a 30 PSIG normalmente

La conexión con el proceso puede ser:

- Bridado
- Roscado
- Soldable

Un actuador neumático típico para válvulas tipo globo que se usa en sistemas de control automático continuo. Este actuador consta de tres partes fundamentales:

- Diafragma y resorte
- Yugo
- Vástago

Los actuadores pueden ser de acción directa o inversa según sea el requerimiento del proceso.

Un diseño típico de válvula de mariposa, que consta de:

- Actuador
- Brazo
- Cuerpo
- Disco

Este tipo de válvulas sólo tienen movimiento rotatorio y generalmente se fabrica en 60° y 90° y sus características de flujo es aproximadamente de igual porcentaje. Su exactitud es menor que la de la válvula de globo, pero su precio es bastante menor.

En los procesos que no requieren muy alta exactitud, ni hermeticidad, la cual será de clase 5 o menor, se puede usar este tipo de válvulas. La capacidad de la válvula o C_v para un tamaño igual a la de la válvula de globo, es mayor. Su caída de presión permanente es menor que la de globo, pero no debe emplearse en aplicaciones de alta presión porque tendría fugas.

Algunos diseños recientes se han hecho a prueba de fuego y con muy baja fuga (1 burbuja por minuto).

Una válvula de bola, la cual también es de tipo rotatorio como la de mariposa; puede usarse en aplicaciones de mediana exactitud y caudal grande. La caída de presión permanente es menor que en la válvula de globo. La velocidad de respuesta es menor que en la de globo y su histéresis es mayor. El C_v o capacidad, es mayor que la de un tamaño correspondiente en la de globo. Puede manejar fluidos abrasivos, y con sólidos en suspensión con facilidad.

Todas las válvulas operan conforme al actuador que se les instale, según los requerimientos de presión, temperatura y rapidez deseados.

El uso de posicionadores en las válvulas de control se deben hacer de acuerdo con la dinámica de los lazos de control, que en resumen es: “usaran posicionadores los lazos de respuesta lenta o con tiempos muertos grandes”.

DIMENSIONES DE VÁLVULAS DE CONTROL

Para determinar el tamaño de una válvula de control para una aplicación, es necesario considerar los siguientes parámetros, con los cuales se calcula el coeficiente de capacidad de flujo de las válvulas:

C_v = coeficiente de capacidad

Q = cantidad de flujo

Δp = caída de presión permanente

G = peso específico del fluido

T = temperatura del fluido

P_1 = presión de entrada

P_2 = presión de salida

1°. Se calcula el C_v de la válvula, con las siguientes formulas:

Para servicio de líquidos

$$C_v = Q (Gf / \Delta p)^{1/2} \quad (\text{Flujo volumétrico})$$

Para servicio de gas y vapor

$$C_v = (Q/963) \{Gg T / [\Delta p (P_1 + P_2)]\}^{1/2} \quad (\text{flujo volumétrico})$$

2°. Con el C_v calculado se consultan catálogos de fabricantes de válvulas y se elige un tamaño de válvula cuyo 70% de apertura corresponda al C_v calculado.

3°. Se elige el actuador según la presión estática del fluido, también en catálogos de los fabricantes.

4°. Se eligen los materiales de los interiores que soporten las condiciones de corrosión, temperatura, abrasión y ruido del fluido que se desea controlar.

5°. Se elige el tipo de conexión de la válvula con la tubería

CAPITULO 3

AUTOMATIZACIÓN

Objetivo: Conocer el término automatización a través de su definición e historia para después comprender la relación que existe entre la automatización y el control de los procesos industriales.

3.1 Definición de automatización

Hoy en día ningún análisis de los procesos estará completo si no se hace referencia a la automatización. Aunque la automatización es nueva en el sentido de que los principios sólo se han aplicado recientemente a los tipos de procesos mecánicos y de ensamble, las ideas básicas no son nuevas. Procesos tales como los del control termostático de la temperatura de las habitaciones se han conocido y aplicado durante algún tiempo. La conocida válvula de flotación que se emplea en los retretes modernos llena automáticamente el tanque hasta un nivel dado y luego se cierra. Las industrias de procesamiento han utilizado los principios de la automatización durante algún tiempo para controlar los procesos químicos.

Ahora bien se entiende por automatización la relación de un producto mediante una o más operaciones industriales sin una directa intervención humana. En otras palabras es la sustitución de personas por máquinas buscando compatibilizar objetivos de eficiencia y flexibilidad en los sistemas productivos mediante la integración de ordenadores y máquinas.

Hay tres tipos, generalmente aceptados, de procesos automáticos: la automatización tipo Detroit, el mecanizado por control numérico y el robotizado.

Lo que se quiere alcanzar con la automatización es integrar varios aspectos de las operaciones de manufactura para mejorar la calidad y uniformidad del producto, minimizar el esfuerzo y los tiempos de producción, mejorar la productividad reduciendo los costos de manufactura mediante un mejor control de la producción, mejorar la calidad mediante procesos repetitivos, reducir la intervención humana, el aburrimiento y posibilidad de error humano, reducir el daño en piezas que resultaría del manejo manual, aumentar la seguridad para el personal, ahorrar área en la planta haciendo más eficiente el arreglo de las máquinas y el flujo de material.

Actualmente se considera la automatización como un sistema en el que se realizan una, o todas, las operaciones siguientes:

1. Mover materiales y partes automáticamente entre las distintas operaciones.
2. Reemplazar el empleo de grandes cantidades de hombres en la operación de las máquinas, mediante el uso de dispositivos llamados servomecanismos, y empleando unos pocos trabajadores altamente especializados para supervisar la operación mecánica.
3. La inspección automática de los productos mediante el uso de dispositivos de control.

4. El uso de dispositivos que pueden ser incluidos en los sistemas mecánicos, y que pueden realizar las operaciones de contar, hacer pedidos, mantener al día los inventarios, volver a pedir, dar instrucciones predeterminadas y tener una memoria infalible.
5. Usar mantenimiento preventivo automático, el que, por ejemplo, no solo lubrica automáticamente, sino que indica la necesidad de una reparación.

La automatización en sentido estricto hace uso de un sistema autocorrector conocido como circuito de retroalimentación el cual, facilita información, a un controlador, el que opera y supervisa el orden mecánico de los acontecimientos (para asegurarse que la operación es realizada correctamente), y el cual a su vez actúa un servomecanismo, que opera la máquina de producción (torno, taladro, maquina de escribir, etc.).

3.2 Historia

Resulta difícil conocer con exactitud cuándo o por quién fueron utilizados por primera vez los principios de la automatización. Desde hace tiempo vienen usándose en distintas variedades algunos procesos de mecanización o de retroalimentación. Actualmente las operaciones se realizan en forma automática en muy buena medida, particularmente por medios electrónicos, y este adelanto marcha a un paso sumamente rápido. La palabra automatización entró al vocabulario técnico hacia 1950, aplicándose generalmente al principio al movimiento de partes o materiales por medio de máquinas automáticas, pasándolos de una etapa en la producción a la siguiente.

Se puede decir que el origen se remonta a los años 1750, cuando surge la revolución industrial. De ahí en 1745 surgen las máquinas de tejido controladas por tarjetas perforadas, en 1817-1870 las maquinas especiales para corte de metal, en 1863 se crea el primer piano automático, inventado por M. Fourmeaux en los años 1856-1890 Sir Joseph Whitworth enfatiza la necesidad de piezas intercambiables, en 1870 aparece el primer torno automático, inventado por Chistopher Spencer, en 1940 surgen los controles hidráulicos, pneumaticos y electrónicos para máquinas de corte automáticas, en los años 1945-1948 John Parson comienza investigación sobre control numérico, y en 1960-1972 Se desarrollan técnicas de control numérico directo y manufactura computarizada.

3.3 Relación entre control de procesos y automatización

Sabemos que la automatización se refiere a lograra una secuencia automática completamente integrada que principia con el insumo de materias primas y termina con un producto final, sin el trabajo o el control humanos excepto el diseño, la construcción del equipo, el proceso original y el mantenimiento del sistema una vez instalado.

Para lograra todo esto existen dentro de la automatización dos áreas. Es aquí en donde encontramos la relación entre la automatización y el control de procesos pues una de las áreas es precisamente la que se ocupa de controlar los procesos, e involucra la retroalimentación de información para la conservación del control de una variable como la

temperatura, la presión la dimensión, o la composición química, dentro de ciertos límites predeterminados. Aquí se encuentra el campo del control de procesos y el control digital o numérico de las máquinas-herramientas.

La segunda área puede requerir o no la retroalimentación de información, y consiste esencialmente en el manejo automático de piezas entre operaciones en forma tal que la pieza se identifique y coloque en la posición exacta para su procesamiento por la operación o la máquina subsecuente.

3.4 Automatización tipo Detroit

La automatización tipo Detroit es simplemente una mecanización que incorpora, quizás, algunos sofisticados controles electrónicos. Es conocida como “tipo Detroit” a causa de su asociación con la industria del automóvil y, más específicamente, por su extensa aplicación en las líneas de producción de Henry Ford. Se resume en una máquina en la cual la materia prima en forma de pieza bruta de fundición es taladrada, escariada, fresada y rectificada para obtener el bloque motor de un automóvil. La pieza de fundición es mecánicamente movida de posición en posición, en cada una de las cuales se realizan operaciones de mecanizado. La calidad del bloque motor es también establecida automáticamente.

Una forma muy común de automatización, que ha sido utilizada desde hace muchos años, es el cambio introducido en la torreta de los tornos y conocido como roscadora automática. Consiste simplemente en un mecanismo que hace que una o más varillas o tubos giren mientras las herramientas (de forma, brocas, de corte, etc.) se van desplazando durante el ciclo de trabajo. A medida que las piezas son terminadas y cortadas, las varillas o los tubos avanzan mediante un mecanismo de empuje hasta un tope fijo, son sujetados por un husillo y puestos en rotación hasta que se termina la pieza y se repite el ciclo. La participación humana se produce sólo cuando es necesaria más materia prima, se debe ajustar alguna herramienta o es necesaria alguna operación de mantenimiento. De este modo un operario puede atender hasta seis de estas máquinas. El tedioso trabajo de montar la torreta del torno ajustar las herramientas y retirar las piezas a medida que se van completando ha sido reemplazado para que sea sólo un problema a resolver ocasionalmente: para la mayoría de operarios una tarea mucho más gratificante.

3.5 Automatización lineal o circular

Se entiende por tipo lineal toda disposición en la cual las unidades del producto se mueven de una estación a la siguiente mediante un transportador o lanzadera que actúan como mecanismo de transferencia. Un ejemplo de esta clase es el de las máquinas embotelladoras de bebidas carbónicas. Las botellas son automáticamente colocadas en el transportador que continuamente las desliza por debajo de la máquina rotativa de llenado. Un cabezal de llenado baja y las llena mientras se van moviendo; cuando una botella se ha llenado, automáticamente cesa la salida de líquido, el cabezal se eleva y gira hasta llegar a la lugar de la siguiente botella en que baja y la contacta. La chapa de cierre es automáticamente colocada y sujeta en las botellas llenas. El control de la cantidad de líquido introducido se puede realizar mediante sensores por el peso de la botella llena o mediante un rayo de luz.

Las botellas llenas son después automáticamente colocadas en cajas de cartón, que son cerradas y apiladas también automáticamente.

Una forma corriente de automatización circular es la mesa rotativa de seis estaciones. Una de las estaciones es utilizada para cargar y descargar las piezas y las restantes para completar el proceso de fabricación.

3.6 Maquinas de control numérico

El control numérico puede definirse, de una forma genérica, como un dispositivo flexible de automatización de una maquina que controla su funcionamiento mediante números. En el control numérico los números constituyen un programa de instrucciones preparado para desarrollar una determinada tarea. Cuando esta tarea se termina se cambia al programa para realizar otro trabajo. Es decir, el mismo equipo productivo puede realizar automáticamente distintos trabajos sin más que cambiar el programa del control numérico

Si bien el control numérico se utiliza en una gran variedad de procesos su aplicación principal es en las maquinas herramientas.

En este campo se puede definir el control numérico como un dispositivo capaz de controlar el movimiento de uno o varios órganos de la máquina de forma automática a partir de los números y símbolos que constituyen el programa de trabajo. Este programa controla o automatiza las siguientes funciones:

- Los movimientos de los carros
- Las velocidades de posicionado y mecanizado
- Los cambios de herramientas
- Los cambios de piezas
- Las condiciones de funcionamiento (refrigeración, lubricaciones, etc.)

El inicio de esta técnica se sitúa en 1948 cuando Parsons Corporation fabrica unos alabes de rotores para helicópteros mediante un ordenador cuyos datos de entrada eran las distintas coordenadas de la herramienta perforada en tarjetas

El parque de maquinas de control numérico instalados crece continuamente de forma que se estima que en 1986 esta tecnología suministra el 25% del trabajo de mecanizado y se prevé que esta cifra sea el 80% al final del siglo, dado que el control numérico es una de las bases de la automatización de los talleres dentro de la filosofía de la fabricación flexible y del CIM (Aplicación integral del ordenador a todas las áreas de producción) Se estima que hoy día existen en España unas 1500 máquinas instaladas.

La evolución tecnológica del control ha sido continua siendo muy rápida y profunda en función de los nuevos desarrollos de la microelectrónica, la informática y la automatización. Los primeros equipos de control numérico con electrónica de válvulas relés y cableados tenían un volumen mayor que las propias maquinas herramientas, con una programación manual en lenguajes maquina muy compleja y muy lenta de programar no se parece en nada a los sistemas actuales basados en microprocesadores con lenguajes de alto nivel y programación interactiva.

Los controladores han sido cada vez más potentes es decir con más funciones y posibilidades de automatización mas fiables y más sencillos de operara y programar. Puede hablarse de cuatro generaciones de maquinas de control numérico de acuerdo con la evolución de la electrónica utilizada.

- Válvula electrónica y relés - 1950
- Transistores - 1960
- Circuitos integrados – 1965
- Microprocesadores – 1975

Por supuesto que paralelamente ha evolucionado también el diseño de las maquinas herramientas tanto en su estructura como en su cadenas cinemáticas en los dispositivos de accionamiento y control y en las funciones de mecanizado, consiguiendo máquinas cada vez mas robustas más precisas y fiables y capaces de desarrollar más operaciones de mecanizado en una sola máquina. Mención aparte merecen los dispositivos especiales para el cambio automático de herramientas y piezas.

En las tres primeras generaciones del control numérico las funciones de control eran desarrolladas por circuitos electrónicos del controlador La incorporación de la tecnología del transistor y del circuito integrado representa un avance en posibilidades, por ejemplo realización de interpolaciones circulares e hiperbólicas, y un aumento de fiabilidad al reducirse drásticamente el número de componentes electrónicos así como una disminución de tamaño de los controladores.

Pero todos estos sistemas tenían un gran inconveniente, la falta de flexibilidad de las funciones de control. Al estar basadas en el hard no era fácil cambiarlas.

A finales de los años 60 nace el control numérico por ordenador. Las funciones de control se realizan mediante programas en la memoria del ordenador de forma que pueden adaptarse fácilmente con sólo modificar el programa.

En esta época los ordenadores eran todavía muy grandes y caros; la única solución practica para el control numérico era disponer de un ordenador central conectado a varias máquinas herramientas que desarrollaba a tiempo compartido todas las funciones de control de las mismas. Esta tecnología se cono ce con las siglas DNC- Direct Numerical Control (control numérico directo)

Con la disminución de precio y tamaño de los ordenadores muy pronto, a principios de los 70 se empezó a aplicar un ordenador pequeño a cada máquina. Esta tecnología recibe el nombre de CNC. Permite que un mismo control numérico pueda aplicarse a varios tipos de máquinas distintas sin más que programar las funciones de control para cada máquina en particular.

Debido a las ventajas que presenta el CNC respecto al Control numérico convencional hoy en día todas las máquinas se diseñan con esta tecnología. Existe sin embargo una amplia base de control numérico instalado en todo el mundo.

Las tendencias actuales de automatización total y fabricación flexible se basan en máquinas CNC conectadas a un ordenador central con funciones de programación y almacenamiento de programas, transmisión de los mismos a las máquinas para su ejecución. Gestiona, en general la actividad de estas máquinas. Esta tecnología se conoce con el nombre de DCN Control Numérico Directo o Distribuido.

La tendencia actual en el control numérico es desarrollar equipos de acuerdo con los sistemas de mecanizado totalmente automáticos controlados por ordenador en unos esquemas descentralizados, flexibles adaptativos y desatendidos

En programación, la tendencia es integrarla en los equipos de diseño gráfico interactivo que permiten aprovechar la geometría de los modelos creados en diseño del producto y efectuar una visualización en la pantalla de los recorridos de la herramienta lo que permiten una verificación instantánea del programa. Se completa con una gran disponibilidad de macros para ciclos de mecanizado repetitivos que mediante la actualización de sus parámetros pueden incluirse en los puntos deseados del programa. La evolución de la programación de control numérico en los últimos años hace prever la comercialización a corto plazo de sistemas expertos que realizarán automáticamente la programación de los controles numéricos sin ninguna intervención humana.

3.7 Robótica

La palabra robot, debido a la ciencia ficción, sugiere la imagen de una máquina de forma parecida a un hombre, que como él puede moverse y ejecutar toda clase de trabajos, dotada de la suficiente inteligencia para responder a condiciones y estímulos de su medio ambiente y actuar en consecuencia.

El robot industrial dista mucho de esta imagen popularizada en la literatura y en los medios de comunicación. Según definición de la RIA (Robot Institute of America), un robot industrial es un manipulador reprogramable y multifuncional diseñado para mover materiales, piezas mecánicas o dispositivos especiales, según trayectorias variables programadas para realizar tareas variadas de forma automática.

Es decir, el robot industrial es una máquina dotada de un elemento móvil al que pueden acoplarse distintas herramientas que puede situar en distintos puntos de trabajo, recorriendo un camino y ejecutar unas operaciones que previamente se han programado e introducido en su memoria. Cambiando el programa puede obtener distintos recorridos para realizar otras operaciones en puntos diferentes.

La industria viene utilizando desde hace muchos años dispositivos mecánicos más o menos automáticos para ayudar al hombre en el movimiento de materiales, piezas y en la ejecución de operaciones peligrosas, penosas o complejas.

En su primera etapa son manipuladores manuales que requieren en concurso de hombre, y que sólo pueden realizar un determinado tipo de trabajo. Por ejemplo, un cargador de un torno automático. En su primera evolución el manipulador se automatiza y es capaz de realizar una secuencia fija de movimientos u operaciones sin intervención humana. No puede cambiarse, salvo costosas modificaciones de diseño, el tipo de trabajo que efectúa y sólo admite pequeñas reglas para cambiar las distancias recorridas o anular algún movimiento.

En realidad estos manipuladores no pueden considerarse como robots según la definición de RIA, dado que no admiten la programación de tareas.

En su concepción actual el Robot industrial nace, en su aspecto mecánico, con los telemanipuladores, desarrollados después de la segunda guerra mundial, primeros años 50, para la operación con materiales radioactivos. Se diseñan unos brazos articulados capaces

de situarse en distintos puntos del espacio y llevar cabo operaciones industriales varias. Pero son operados manualmente y no disponen de memoria ni por tanto de programas de trabajo. Simplemente repiten las acciones que ejecuta el operador. Posteriormente la unión mecánica entre el dispositivo que maneja el operador y el que realiza la acción se sustituye por un enlace eléctrico que mediante señales acciona los servomotores del manipulador. El movimiento del brazo pasa a ser controlado según principios del control numérico en las maquinas herramientas y se incorpora el ordenador como elemento de control. Estamos a principios de los 70.

La incorporación de la electrónica e informática para el gobierno del brazo articulado conforma ya el robot industrial. De la mano del desarrollo de la microelectrónica con incorporación de sensores, se fabrican los primeros Robots inteligentes, en el sentido de que son capaces de reaccionar según un programa a unas ciertas condiciones del entorno, como corregir errores de posición, detectar objetos, calcular distancias etc. Estamos a finales de la década de los setenta, y la aplicación del robot a la industria crece de forma exponencial. Paralelamente se desarrollan también los sistemas de programación de robots. El desarrollo actual de la tecnología de robots tiende a conseguir:

- a) Sensores que le permiten percibir el entorno a semejanza de los sentidos humanos, especialmente vista y tacto.
- b) Disponer de un nivel de Inteligencia Artificial que le permita interpretar las señales enviadas por sensores y adaptara su trabajo a los mismos.
- c) La configuración general de una instalación robótica consta de cuatro partes básicas:
 - 1) El manipulador Una estructura mecánica formada por una serie de partes, unidas entre si por articulaciones, movidas por unos servomecanismos que permiten situarlas en una posición determinada de su recorrido. Unos sensores internos que permiten identificar la posición alcanzada, y un elemento terminal para ejecutar la operación industrial prevista.
 - 2) El controlador Esta formado por uno o varios microordenadores que controlan los servomotores de la cadena cinemática para ejecutar los movimientos y operaciones previstas en el programa almacenado en su memoria y de acuerdo con la información facilitada por los sensores internos del manipulador o externos del entorno.
 - 3) El entorno formado por el conjunto de objetos que están dentro del campo de acción de robot, condicionan su forma de trabajo y mediante sensores es capaz de transmitirle la información necesaria para que se adapte a as modificaciones del mismo.
 - 4) Desarrollar las secuencias de movimientos de operaciones del robot en lenguaje de alto nivel que facilite la programación de tareas complejas. Precisa de información del entorno y de las características del manipulador y del control.

MANIPULADOR

Presenta configuraciones muy distintas tanto en forma como en tamaño. La más utilizada es la que simula el movimiento de un brazo por lo que sus componentes reciben el nombre de partes del cuerpo humano. Así la base o estructura fija se llama cuerpo. El primer elemento

móvil, el brazo, se une al cuerpo mediante una articulación (hombro). Un segundo elemento móvil, unido al primero por el codo, termina en la muñeca a la que esta unida la mano o herramienta.

Los tipos de articulación que pueden utilizarse son:

- La giratoria que permite movimientos de giro en un plano.
- La planar que proporciona desplazamientos en un plano.
- La cilíndrica que permite giro en un plano y desplazamiento normal al mismo.
- La prismática, que desplaza en una dirección.
- La esférica que permite giros en todas direcciones.
- La de tornillo que provoca un movimiento helicoidal.

En robótica las más utilizadas son la giratoria y la prismática

Sistema de control de un robot

El sistema de control de un robot tiene como objetivo el gobernar sus movimientos para llevar a cabo una tarea determinada.

La configuración física –hard- de un sistema de control presenta múltiples variedades en función de las presentaciones del robot y la tecnología de control utilizada.

Podemos distinguir:

Unidad de memoria para almacenamiento del programa que define las tareas a ejecutar.

Unidad de cálculo que determina posiciones, velocidades y fuerzas en cada uno de los elementos articulados para alcanzar los movimientos programados.

Unidad de entrada-salida que le permite la comunicación con los motores y sensores del manipulador y con el operador.

Unidad de control de los servos de cada articulación

Unidad de proceso que coordina las acciones de todos los elementos del sistema de control.

Panel de mando que permite la actuación manual del operador sobre el robot para puesta en marcha y paro de la maquina, confección e introducción manual del programa, y verificación del programa antes de su utilización en modalidad automática, etc.

Control de trayectorias. Las trayectorias de la mano del robot se pueden clasificar en, punto a punto, continuas, continuas controladas.

La trayectoria punto a punto se utiliza para operaciones de carga y descarga de piezas, almacenajes, soldadura por puntos, etc.

En la trayectoria continua el robot debe ser capaz de seguir, dentro de unos límites de precesión una trayectoria definida.

En las trayectorias continuas controladas además de seguir un camino definido se controla la velocidad y la aceleración.

La resolución espacial mide la mínima distancias que puede situarse un punto de otro

La precisión nos mide diferencia entre posición teórica y posición real alcanzada,

La repetitividad mide la diferencia de posicionamiento real al repetir una misma instrucción varias veces.

Hasta la fecha la mayoría de sistemas implantados industrialmente opera en dos dimensiones para la localización y reconocimiento de piezas situadas en una superficie plana y sin interferencias entre sí con otras piezas. Pero se han desarrollado ya sistemas que pueden localizar piezas en el espacio y reconocer formas en tres dimensiones lo que permite prever para dentro de unos años su incorporación a los robots industriales.

CAPITULO IV

CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES ELEMENTALES

Objetivo: Informar al alumno sobre algunas de las principales operaciones unitarias de procesos y analizar las mallas simples y compuestas que comúnmente se emplean en su control.

4.1 Variable controlada

La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. Normalmente la variable controlada es la salida del sistema.

4.2 Variable manipulada

La variable manipulada es la cantidad o condición modificada por el controlador, a fin de afectar la variable controlada.

4.3 Definición de sistema

Sistema es una combinación de componentes que actúa conjuntamente y cumplen determinado objetivo. Un sistema no está limitado a objetivos físicos. El concepto de sistema puede ser aplicado a fenómenos abstractos y dinámicos, como los de la economía. Por tanto, hay que interpretar el término “sistema” como referido a sistemas físicos, biológicos, económicos, etc.

Un sistema es un conjunto o colección de cosas conectadas o relacionadas de manera que constituyan un todo.

4.4 Definición de perturbaciones

Una perturbación es una señal que tiende a afectar adversamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema, se la denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema y constituye una entrada.

4.5 Control retroalimentado

Los diferentes aspectos del control automático se comprenderán mejor si se describen con un ejemplo.

El proceso que se muestra en la figura 4.1. Se trata de un líquido en movimiento que se va a calentar a una temperatura deseada por medio de vapor que fluye por los serpentines de calentamiento. La temperatura del flujo de salida es afectada por factores (variables de proceso) como temperatura del líquido entrante, gasto del líquido, temperatura del vapor,

capacidades caloríficas de los fluidos, pérdidas de calor del depósito y velocidad de la mezcladora.

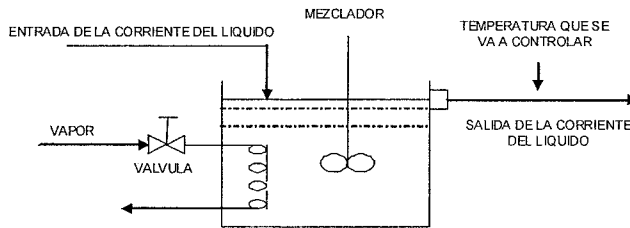


Fig. 4.1

Sistemas de circuito abierto y cerrado. El sistema ilustrado en la figura 4.1 se clasifica normalmente como de "circuito abierto". Los sistemas de control de circuito abierto son aquellos en que la información sobre la variable controlada (en este caso, la temperatura) no se emplea para ajustar cualquiera de las entradas del sistema, con el fin de compensar las variaciones de las variables del proceso. El término "circuito abierto" se encuentra con frecuencia en las exposiciones que tratan de sistemas de control, para indicar que se está estudiando la dinámica no controlada del proceso.

Un sistema de control de circuito cerrado implica que la variable controlada es la que se mide, y el resultado de esta medición sirve para manipular cualquiera de las variables de proceso, por ejemplo, el flujo de vapor.

En el sistema de control de circuito cerrado, la información sobre la variable controlada se vuelve a alimentar como base para controlar una variable de proceso, de donde se le asigna como "control de retroalimentación o alimentación inversa de circuito cerrado". Esta retroalimentación se logra a través de la acción de un operador (control manual) o por medio de instrumentos (control automático).

En el caso de control manual, según la figura 4.1 el operador mide periódicamente la temperatura; si esta es, por ejemplo, inferior al valor deseado, el operador aumenta la circulación de vapor abierto levemente la válvula. Cuando se trata de un control automático, se emplea un dispositivo sensible a la temperatura para producir una señal (eléctrica, neumática, etc) proporcional a la temperatura media. Esta señal se alimenta a un controlador que compara con un valor deseado preestablecido, o punto de ajuste. Si existe una diferencia, el controlador cambia la abertura de la válvula de control de vapor para corregir la temperatura como se indica en la figura 4.2

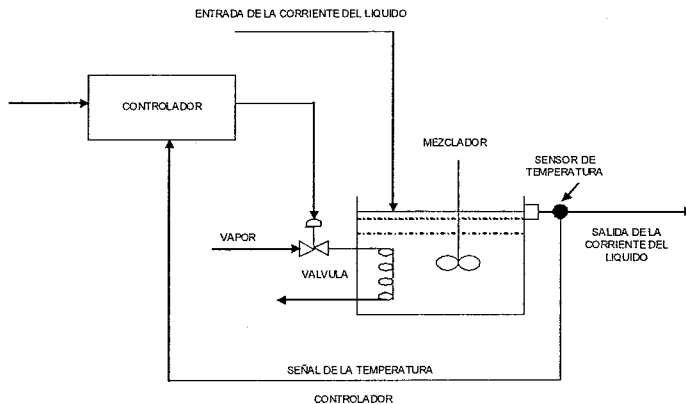


Fig. 4.2

El control de alimentación directa es de empleo general. Las perturbaciones de proceso se miden y compensan sin esperar a que un cambio en la variable controlada indique que ha ocurrido una perturbación. El control de alimentación directa es muy útil también en los casos en que la variable controlada final no se puede medir. En el ejemplo ilustrado en la figura 4.3 el controlador de alimentación directa tiene la capacidad de computar y utilizar el gasto medido de líquido de entrada y su temperatura, para calcular el gasto de vapor necesario para mantener la temperatura deseada en el líquido de salida.

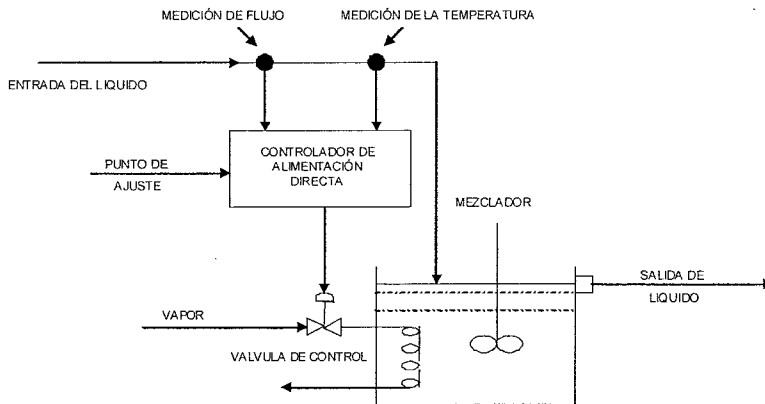


Fig. 4.3

La ecuación que resuelve el controlador relaciona el contenido calorífico del líquido de entrada, el flujo de vapor y la temperatura del líquido de salida, se designa usualmente como modelo del proceso. Es muy raro encontrar modelos y controladores perfectos, de manera que es más conveniente utilizar una combinación de control de retroalimentación y alimentación directa figura 4.4

La configuración de un controlador que proporciona el punto de ajuste para otro controlador se conoce como control en cascada y se emplea común, ente en el control de retroalimentación

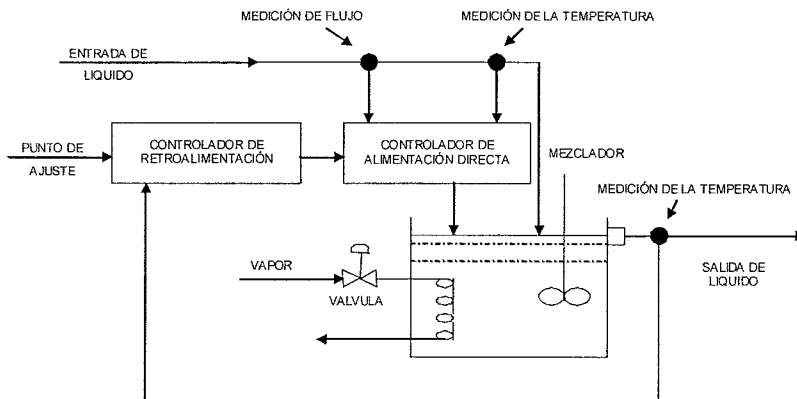


Fig. 4.4

4.5.1 Sistema de control de retroalimentación

Cuando un controlador automático se agrega a un proceso, el funcionamiento depende de la naturaleza del proceso, del tipo del equipo de control, y del cuidado con que se ajuste el controlador. Por ejemplo, para el cambio de punto de referencia, es deseable que el proceso llegue a su nuevo punto de operación tan rápidamente como sea posible. Desde un punto de vista ideal, en un proceso simple, esto significaría cambiar en forma instantánea la variable manipulada a su valor máximo o mínimo, y conservarla ahí hasta que el proceso llegue al nuevo valor deseado, y luego reajustar tan bien en forma instantánea dicha variable a su nuevo valor de equilibrio. En la figura 4.5 se ilustran tres grados de eficiencia del control automático de un proceso sencillo: condiciones idealizadas, funcionamiento obtenible y control reducido. El empleo de computadoras como controladores de proceso ha hecho posible controlar el funcionamiento de algunos procesos de una manera muy cercana a la acción idealizada que se ilustra en la figura 4.5

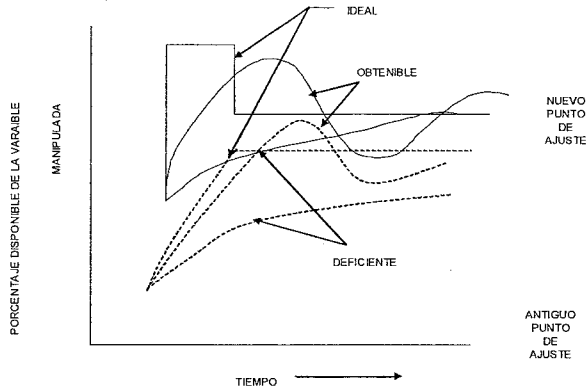


Fig. 4.5

Dentro de los requisitos económicos y técnicos del proceso, los dos objetivos que se buscan al aplicar un controlador automático a un proceso son: 1) reducir el orden del sistema de proceso del controlador al orden práctico más bajo posible y 2) reducir la constante de tiempo del sistema de proceso del controlador al valor práctico más pequeño.

Muchos diagramas de bloques de sistemas de control con retroalimentación lineal se pueden reducir a la forma ilustrada en la figura 4.6 KG que es la función de transferencia del circuito directo, incluye todos los elementos entre el sensor de error y la salida C y H es la función de transferencia de la trayectoria de retroalimentación. El totalizador determina la diferencia entre el punto de ajuste R y la señal de retroalimentación B.

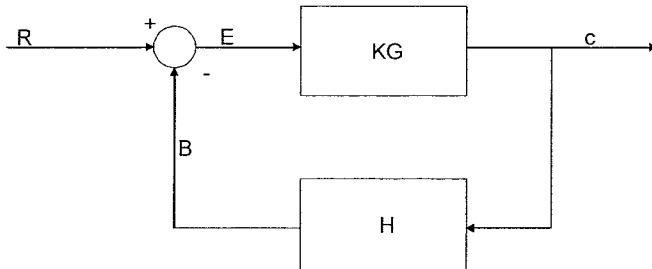


Fig. 4.6

La relación entrada – salida C/R se determina basándose en las ecuaciones que describen cada bloque. Dicho de otra manera,

$$\text{Totalizador: } E = R - B$$

$$\text{Trayectoria directa: } C = KGE$$

$$\text{Trayectoria de retroalimentación: } B = HC$$

Después de hacer la sustitución correspondiente en la ecuación del totalizador y resolver para C/R,

$$C/R = KG / (1 + KGH)$$

Esta ecuación, que es una de las más útiles para el análisis de sistemas de control, describe cualquier sistema lineal que se puede reducir a la forma indicada en la figura

El numerador es la función de transferencia para circuito con alimentación directa y el denominador es uno más la función de transferencia del circuito directo pro la función de transferencia del circuito de retroalimentación. Este producto se conoce como función de transferencia de circuito abierto.

Si la ecuación se vuelve a escribir, se tendrá

$$\frac{C}{R} = \frac{\text{función de transferencia del circuito directo}}{1 + \text{función de transferencia del circuito abierto}}$$

4.5.2 Servosistemas

Se llama servosistemas (o servomecanismo) a un sistema de control retroalimentado en el que la salida es algún elemento mecánico, sea posición, velocidad o aceleración. Por lo tanto, los términos servosistemas o sistemas de control de posición o de velocidad o de aceleración, son sinónimos. Estos servosistemas se utilizan ampliamente en la industria moderna Por ejemplo con el uso de servosistemas e instrucción programada se puede lograr la operación totalmente automática de máquinas herramientas. Nótese que a veces se denomina también servosistemas a un sistema de control cuya salida debe seguir con exactitud una trayectoria determinada en el espacio (como la posición de una aeronave en el espacio en un sistema de aterrizaje automático). Los ejemplos incluyen el sistema de control de una mano de robot, en que la misma deber seguir una trayectoria determinadas en el espacio, al igual que una aeronave en el sistema de control de aterrizaje.

4.5.3 Sistema de control de lazo cerrado

Un sistema de control de lazo cerrado es aquel en el que la señal de salida tiene efecto directo sobre la acción de control.

Esto es, los sistemas de control de lazo cerrado son sistemas de control realimentado. La señal de error actuante que es la diferencia entre la señal de entrada y la de realimentación (que puede ser la señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas), entra al detector o control de manera que reduce el error y llevar la salida del sistema al valor deseado. En otras palabras, el termino “lazo cerrado” implica el uso de acción de realimentación para reducir el error del sistema. La figura 4.7 muestra la relación entrada – salida de un sistema de control de lazo cerrado. Una figura como esta recibe el nombre de diagrama de bloques.

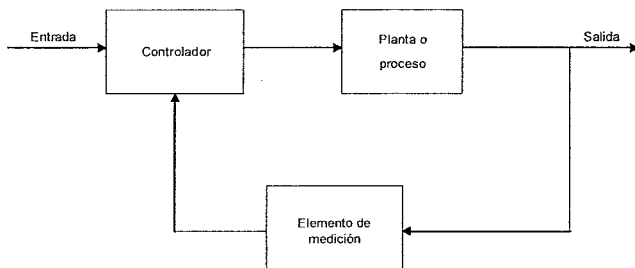


Fig. 4.7

Para ilustrar el concepto de sistema de control de lazo cerrado se considera un sistema térmico aquí actúa un ser humano como controlador. Su intención es mantener la temperatura del agua caliente a un valor determinado. El termómetro instalado en el caño de salida del agua caliente indica la temperatura efectiva. Esta temperatura es la salida del sistema. Si el operador observa el termómetro y descubre que la temperatura es superior a la deseada, reduce la entrada de valor para bajar esa temperatura. Es bien posible que la temperatura llegue ahora a ser excesivamente baja, en cuyo caso hará falta repetir la secuencia de operaciones en sentido contrario.

4.5.4 Sistemas de control de lazo abierto.

Un sistema de control de lazo abierto es un sistema de control en el que la salida no tiene efecto sobre la acción de control.

Es decir, en un sistema de control de lazo abierto la salida ni se mide ni se realimenta para comparación con la entrada. La figura 4.8 muestra la relación entrada – salida de tal sistema. Un ejemplo práctico es la máquina de lavar. El remojo, lavado y enjuague en la maquina de lavar se cumple sobre una base de tiempos. La máquina no mide la señal de salida, es decir, la limpieza de la ropa.

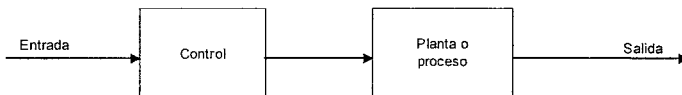


Fig. 4.8

En un sistema de control de lazo abierto cualquiera, no se compara la salida con la entrada de referencia. Por tanto, para cada entrada de referencia corresponde una condición de operación fijada. Así, la exactitud del sistema depende de la calibración. (Los sistemas de control de lazo abierto deben ser cuidadosamente calibrados y para que sean útiles deben mantener esa calibración).

4.6 Modelos matemáticos

Un modelo es la representación aproximada de la realidad considerando simplicidad y exactitud en el resultado de su análisis. Un modelo matemático es un conjunto de ecuaciones que relacionan las variables de interés del proceso y representan adecuadamente su comportamiento; existen distintos modelos para distintos objetivos y tipos de procesos. En el análisis y desarrollo de sistemas de control, es factible utilizar gran variedad de modelos matemáticos de procesos y ecuaciones de control.

La metodología para la formulación y obtención de modelos matemáticos se puede dividir en cuatro pasos:

1. Selección de las variables que intervendrán en el modelo matemático

Se realiza con base en el tipo de análisis que se desea practicar al sistema. Por ejemplo: En un sistema eléctrico, las variables pueden ser el voltaje en el capacitor o la corriente en la inductancia y en algunos casos pueden ser ambas.

En un sistema hidráulico, las variables pueden ser la altura que tiene la columna del fluido o la presión en el fondo de alguno de los recipientes que forman el sistema, también pueden ser ambas variables en algunos casos.

En un sistema mecánico traslacional, las variables pueden ser desplazamiento, velocidad, aceleración o la fuerza en alguno de los resortes que forman el sistema, sin embargo, se puede seleccionar la combinación de Algunas de las variables mencionadas.

2. Leyes o ecuaciones de los elementos

En esta etapa se deben plantear las ecuaciones que definen el comportamiento físico para cada uno de los elementos que forman el sistema. Cabe mencionar que se deben plantear tantas ecuaciones como cantidad de elementos tenga el sistema, por ejemplo. En un sistema mecánico rotacional formado por tres inercias, dos resortes rotacionales y tres amortiguadores rotacionales se deben plantear ocho ecuaciones de elementos y una ecuación para cada elemento.

3. Leyes de conjunto o ecuaciones de equilibrio

Se debe dividir el sistema que se desea modelar en subsistemas y plantear las ecuaciones de equilibrio para cada uno de ellos, por ejemplo. Un sistema mecánico formado por dos masas, un resorte y un amortiguador, puede ser dividido en dos subsistemas, el primero está

formado por una masa y un resorte y el segundo por una masa, un resorte y un amortiguador, en este caso se deben plantear dos ecuaciones de equilibrio.

4. Obtención del modelo matemático

En esta última etapa, se debe hacer la combinación y simplificación necesaria de las ecuaciones planteadas en las etapas dos y tres, a fin de obtener una o varias ecuaciones que representen el modelo matemático final que servirá para definir el comportamiento físico del sistema considerado.

Ahora se presenta un ejemplo con un sistema eléctrico con el fin de ilustrar el procedimiento para obtener el modelo matemático de sistemas de este tipo.

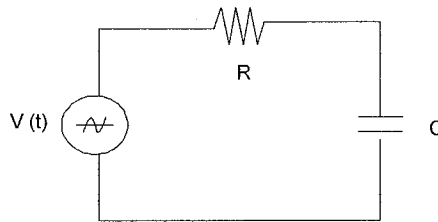


Fig.4.9

En la figura 4.9 se muestra que el sistema consta de una resistencia y una capacitancia alimentadas por una fuente de voltaje $V(t)$.

Aplicando el procedimiento descrito:

Selección de variables. En este caso la variable que se empleará para plantear el modelo es el voltaje en el capacitor.

Leyes de elementos. El sistema está formado por dos elementos (resistencia y capacitancia), y una fuente de alimentación, por lo tanto únicamente hay dos ecuaciones, una para cada elemento y estas son:

$$V_R = Ri_R \quad \dots (4.1)$$

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt} \quad \dots (4.2)$$

Leyes de conjunto. Para el sistema considerado hay únicamente un nodo (1) y una sola malla (1) Fig. 4.10

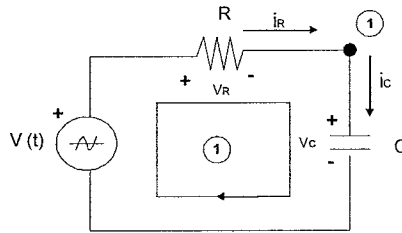


Fig.4.10

Aplicando las leyes de voltaje y de corriente de Kirchoff, las ecuaciones de equilibrio son:

$$V_R + V_C - V(t) = 0 \quad \dots (4.3)$$

$$i_R - i_C = 0 \quad \dots (4.4)$$

Obtención del modelo matemático. De las ecuaciones (4.1) y (4.4) se tiene:

$$V_R = Ri_C \quad \dots (4.5)$$

Sustituyendo la ecuación (4.2) en la (4.5):

$$V_R = RC \frac{dV_C}{dt} \quad \dots (4.6)$$

Sustituyendo la ecuación (4.6) en la (4.3):

$$RC \frac{dV_C}{dt} + V_C = V(t) \quad \dots (4.7)$$

La ecuación (4.7) representa el modelo matemático que define el comportamiento de una de las variables del sistema considerado. Presentándolo en forma normalizada, esto es, la derivada de mayor orden, tendrá coeficiente unitario, por lo que:

$$\frac{dV_C}{dt} + \frac{1}{RC} V_C = \frac{1}{RC} V(t) \quad (4.8)$$

Los modelos pueden tomar muchas formas distintas. Según el sistema particular de que se trate y las circunstancias, una representación matemática usando ecuaciones diferenciales de primer orden como la que se obtuvo puede ser más adecuada en problemas de control

óptimo que otras representaciones. Pero para el análisis de respuesta a transitorios o el análisis de respuesta de frecuencia de sistemas de una sola entrada y una sola salida, la representación de la función de transferencia puede ser más conveniente.

La función de transferencia de un sistema lineal invariante en el tiempo está definida como la relación de la transformada de Laplace de la salida (función respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada (función excitadora), bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero.

Sea el sistema lineal invariante en el tiempo definido por la siguiente ecuación diferencial:

$$\begin{aligned}
 a_0 y + a_1 \overset{(n-1)}{y} + K + a_{n-1} \overset{(n)}{y} + a_n y \\
 = b_0 \overset{(m)}{x} + b_1 \overset{(m-1)}{x} + \Lambda + b_{m-1} x + b_m x \quad (n \geq m) \quad (4.9)
 \end{aligned}$$

Donde y es la salida del sistema y x es la entrada. Se obtiene la función transferencia de este sistema tomando las transformadas de Laplace de ambos miembros de la ec. Bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero, o sea

$$\text{Función transferencia} = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \Lambda + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + K + a_{n-1} s + a_n} \quad (4.10)$$

La función de transferencia es una expresión que relaciona la salida y la entrada de un sistema lineal invariante en el tiempo, en términos de los parámetros del sistema, y es una propiedad del sistema en sí, independientemente de la función de entrada excitadora. La función transferencia incluye las unidades necesarias para relacionar la entrada con la salida; sin embargo, no provee ninguna información respecto a la estructura física del sistema (Las funciones de transferencias de muchos sistemas físicamente distintos, pueden ser idénticas). Usando este concepto se puede representar la dinámica de un sistema por ecuaciones algebraicas en s . La potencia más alta de s en el denominador de la función de la función transferencia es igual al orden del término de la derivada más alta de la salida. Si la potencia más alta de s es igual a n se dice que se trata de un sistema de n ésimo orden.

Ahora se estudiará un sistema mecánico de traslación y se obtendrá su función de transferencia.

Sea el sistema de resorte, masa y amortiguador que se muestra Figura 4.11

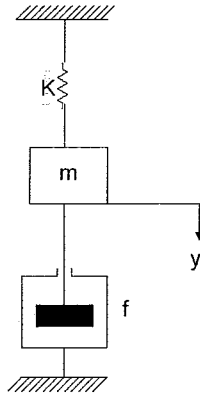


Fig.4.11

Un amortiguador es un dispositivo que provee fricción viscosa o amortiguamiento. Consiste en un pistón y un cilindro relleno de aceite. Cualquier movimiento relativo entre el eje del pistón y el cilindro, encuentra resistencia producida por el aceite, debido a que este debe fluir alrededor del pistón (o a través de orificios provistos en el Pistón), de un lado del pistón al otro. El amortiguador esencialmente absorbe energía. Esta energía absorbida es disipada como calor y el amortiguador no almacena ninguna energía cinética ni potencial. Se debe obtener la función de transferencia desde el sistema, suponiendo como entrada a la fuerza $x(t)$ y como salida el desplazamiento $y(t)$ de la masa. Se deja de proceder de acuerdo con los siguientes pasos:

1. Plantear la ecuación diferencial del sistema
2. Tomar la transformada de Lapalce de la ecuación diferencial suponiendo todas las condiciones iniciales iguales a cero.
3. Hallar la relación de la salida $Y(s)$ respecto a la entrada $X(s)$. Esta relación es la función de transferencia.

Para establecer una ecuación diferencial invariante con el tiempo, se supone que la fuerza de reacción del amortiguador es proporcional a y y que el resorte es un resorte lineal; estrictamente, que la fuerza del resorte es proporcional a y . En este sistema m indica la masa, f el coeficiente de fricción viscosa, y k indica la constante del resorte.

La ley fundamental que gobierna los sistemas mecánicos es la ley de Newton. Para sistemas traslacionales la ley establece que

$$ma = \sum F \quad (4.11)$$

Donde

m = masa en slug

a = aceleración en pie/seg^2

F = fuerza en libras

Aplicando la ley de Newton al sistema en estudio se obtiene

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -f \frac{dy}{dt} - Ky + x \quad (4.12)$$

o

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + f \frac{dy}{dt} + ky = x \quad (4.13)$$

Tomando la transformada de Laplace de cada término

$$\mathcal{L} \left[m \frac{d^2 y}{dt^2} \right] = m \left[s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0) \right] \quad (4.14)$$

$$\mathcal{L} \left[f \frac{dy}{dt} \right] = f [sY(s) - y(0)] \quad (4.15)$$

$$\mathcal{L} [ky] = kY(s) \quad (4.16)$$

$$\mathcal{L} [x] = X(s) \quad (4.17)$$

Si se fijan las condiciones iniciales iguales a cero, de manera que $y(0)$, la transformada de Laplace puede ser escrita como

$$(ms^2 + fs + k)Y(s) = X(s) \quad (4.18)$$

Tomando la relación de Y encontramos que la función transferencia del sistema es:

$$\text{Función de transferencia} = G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{ms^2 + fs + k} \quad (4.19)$$

Es importante señalar que el estudio y obtención de modelos matemáticos actualmente se puede realizar con ayuda de programas de computadoras.

Las computadoras electrónicas se han convertido en instrumentos valiosos para analizar sistemas de control, gracias a la simulación. Cualquier proceso, con sus sistemas de control, se puede simular programando una computadora electrónica, de tal manera que contenga un modelo matemático del proceso y sistema de control. Este modelo matemático responde a las perturbaciones y los ajustes o modificaciones, en la misma forma que sucedería en un proceso real. No obstante, las respuestas se observan como variables de proceso o control automáticamente graficadas, impresiones de salida de datos de computadora digital o presentaciones de tubos de rayos catódicos en laboratorio, en lugar de hacerlo en planta.

La simulación de un proceso y su sistema de control se divide en dos partes: la preparación del modelo y el empleo de este para estudiar el control del proceso. Los conocimientos concernientes al desarrollo del proceso en el curso de la preparación de un modelo, que responda a las perturbaciones en la misma manera que dicho proceso, conduce, a menudo, a soluciones de los problemas de control, que difícilmente se pueden obtener mediante otras técnicas de análisis.

El desarrollo de una simulación de proceso se compone normalmente de cuatro etapas básicas:

1. Definición del proceso y derivación de un modelo matemático.
2. Determinación de los factores de escala del modelo y restricciones requeridas.
3. Programación de la computadora
4. Verificación y corrida de la simulación.

La simulación se debe considerar sólo como modelo del proceso que representa, con limitaciones determinadas por factores como las suposiciones previstas para simplificar el modelo matemático, el detalle con que se describe el proceso, el cúmulo de conocimiento que se tienen sobre él, la experiencia del programador y el tamaño de la computadora.

El empleo de la simulación en el análisis de sistemas de control es fundamentalmente un procedimiento de prueba y error. Los resultados de otras técnicas de análisis de sistemas de control pueden contribuir al análisis proporcionando un punto de partida o lineamientos para analizar la simulación. El estudio de simulación se desarrolla ejecutando varios métodos de control, haciendo corridas de simulación para comprobar tales métodos y evaluando el rendimiento relativo de cada uno de ellos. En algunos casos, la simulación sirve para confirmar o demostrar técnicas de control desarrolladas por otros métodos.

La utilidad de la simulación se ve enriquecida por la escala del tiempo. Según los requisitos del problema, la simulación se puede realizar con velocidades mucho más rápidas o lentas que las que caracterizan al proceso real.

El análisis de un sistema de control mediante la simulación se caracteriza por la facilidad con que las corridas se ejecutan y se producen variaciones en los parámetros. La simulación tiene también la capacidad de computar variables que no serían accesibles con las mediciones directas en un proceso real, por ejemplo, la velocidad de reacción de un proceso químico. La simulación de un sistema de control por computadora permite la verificación experimental de ese género de variables computadas para ejercer un control junto con varios algoritmos de control, y configuraciones y ajustes del control.

La simulación de proceso computarizada permite estudiar el control de proceso en un sistema en línea, es decir realizar experimentos con el proceso más o menos de la misma manera como se haría en el caso real. Algunas ventajas de la simulación en relación con la

experimentación en la planta son: se reduce los riesgos económicos y físicos comprendidos en el manejo del proceso real; la escala de tiempo se reduce o se aumenta en comparación con el proceso real, según las necesidades del experimentador; es factible realizar desviaciones en las condiciones de procesamiento que quedan fuera del intervalo normal de operación, y se pueden hacer modificaciones del proceso programando cambios más que modificando equipos de proceso, lo cual permite estudiar la interacción del diseño de control y del proceso.

El laboratorio de simulación puede contener computadoras analógicas, una computadora digital o un sistema híbrido de computadora analógica-digital integrado.

Para evaluar las ventajas relativa de los diferentes tipos de computadora para simulación, es preciso tomar en cuenta los siguientes factores.

5. El tiempo de corrida de diferentes computadoras para alcanzar una simulación dada y el costo resultante.
6. El tiempo de programación y reprogramación para la ejecución inicial y modificaciones posteriores (en línea o fuera de línea) del programa.
7. La conveniencia y la importancia de la interacción hombre-maquina entre el operador y la computadora.

La programación de una computadora digital para simulación se realiza, casi siempre, utilizando un lenguaje general de tipo científico, por ejemplo, el FORTRAN o el ALGOL, o bien recurriendo a un lenguaje de programación especializado desarrollado específicamente para la simulación.

Los lenguajes de simulación digital para fines generales se diseñan para programar computadoras digitales, con el fin de simular gran variedad de sistemas. Hay básicamente dos categorías del lenguaje de simulación para fines generales; las que se emplean para sistemas continuos y las de eventos discretos.

Los lenguajes de simulación digital para fines especiales se diseñan de tal modo que los ingenieros de un campo especializado puedan escribir un programa utilizando un vocabulario de términos y definiciones relacionados directamente con el sistema que se desea simular. Por ejemplo, el ECAP (Electronic Circuit Análisis Program) para análisis de circuitos eléctricos, permite utilizar ca de estado estacionario, cc de estado estacionario, así como respuestas transitorias de circuitos que se obtienen por simulación digital.

Los lenguajes de simulación para sistemas continuos desarrollados para simular sistemas dinámicos se han derivado de técnicas de programación que se han utilizado desde hace mucho tiempo en la computación analógica. Varios de ellos emplean la notación del tipo de diagrama de bloques y le proporcionan al analista facilidades que previamente estaban sólo a disposición de los usuarios de las computadoras analógicas. Un programa de desarrollo mediante el empleo de este tipo de lenguaje de simulación puede tener una corrida más lenta que si se hubiera desarrollado con un lenguaje científico de programación. Sin embargo, su preparación requiere menos esfuerzos. Debido al número de lenguajes de programación para la simulación dinámica continua que se ha desarrollado en sólo unos cuantos años, la empresa Simulation Concils, Inc. (sociedad profesional dedicada a la simulación) y se estableció un comité con el fin de formular normas para programar simulaciones. Uno de

los resultados del trabajo de este comité fue un nuevo programa de simulación digital, el CSSL (continuous systems simulation language), que contiene características que se encuentran en más de 20 lenguajes antiguos.

Se ha registrado una gran proliferación de lenguajes de simulación de eventos discretos, y entre los más conocidos están SIMSCRIPT y TPSS.

Existe gran cantidad de procesos industriales que pueden ser representados por medio de modelos matemáticos, en las siguientes paginas se describirán seis sistemas en los cuales existen procesos a controlar y que pueden ser representados por medio de modelos matemáticos. Es importante aclarar que algunos de los modelos fueron obtenidos por medio de un simulador llamado MATLAB.

4.7 Intercambiador de calor

Ahora se obtendrán las relaciones que existen entre los cambios permanentes de temperatura en la salida de un intercambiador de calor, y el cambio permanente de temperatura en la entrada del mismo.

Para tal fin, empecemos considerando el flujo de calor a través de una pared cilíndrica, en la que el fluido interior está a una temperatura más elevada que la del fluido exterior. En este análisis se considerará que no existe fluido de calor a través de la cubierta y que temperatura en el seno de los fluidos es constante en el sentido radial, según se indica en la figura 4.12.

En estado permanente existen 3 caídas de temperatura bien definidas: $t_1 - t_2$ en la película interior; $t_2 - t_3$ en la pared y, $t_3 - t_4$ en la película exterior.

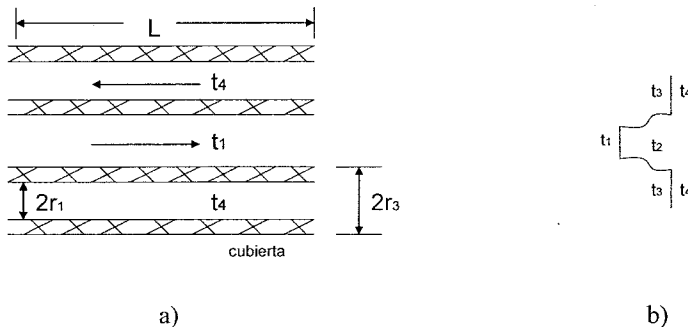


Fig. 4.12 a) Intercambiador de flujos encontrados
 b) Perfil de temperatura en un plano perpendicular al dibujo

En estado permanente el flujo por unidad de longitud viene dado por la siguiente ecuación.

$$q' = \frac{t_1 - t_4}{\frac{1}{h_{12} 2\pi r_1} + \frac{\ln(r_3 / r_1)}{2\pi k} + \frac{1}{h_{23} 2\pi r_3}} \quad (4.20)$$

Donde

h_{12} , h_{23} = coeficiente de la temperatura interior y de la exterior de la pared cilíndrica, respectivamente, $\frac{Kcal}{^\circ Csegm^2}$

r_1 , r_3 = radios interior y exterior, en metros (m)

k = conductividad del metal, $\frac{Kcal}{^\circ Csegm}$

q' = flujo de calor por unidad de longitud, $\frac{Kcal}{segm}$

t_1 , t_4 = temperaturas promedio, $^\circ C$

El flujo de calor a través de una tubería de L metros de longitud, en la que imperan las mismas temperaturas, será

$$q = q' L \quad (4.21)$$

Si definimos

U_1 = coeficiente total de transferencia de calor, referido al área interior, $Kcal/^\circ C \text{ seg m}^2$

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_{12}} + \frac{A_1 \ln(r_3 / r_1)}{k 2\pi L} + \frac{A_1}{h_{23} A_3}} \quad (4.22)$$

Donde

$A_1 = 2 \pi r_1 L$ = área lateral interior de caldeo (m^2)

$A_3 = 2 \pi r_3 L$ = área lateral exterior de caldeo (m^2)

Podemos definir el coeficiente U_3 , referido al área exterior.

$$U_3 = \frac{1}{\frac{A_3}{h_{12} A_1} + \frac{A_3 \ln(r_3 / r_1)}{k 2\pi L} + \frac{1}{h_{23}}} \quad (4.23)$$

Utilizando la ecuación. La ecuación (4.20) y usando las definiciones (4.22) y (4.23) la ecuación (4.21) se convierte en

$$q = U_1 A_1 (t_1 - t_4) = U_3 A_3 (t_1 - t_4) \quad (4.24)$$

En un intercambiador tanto el fluido interior como el exterior están en movimiento. De esto se infiere que ambas temperaturas cambian con la distancia longitudinal, de tal modo que la ecuación anterior no puede usarse.

Se propone entonces la siguiente ecuación

$$q = UA (\Delta t)_m \quad (4.25)$$

Donde

$$UA = U_1 A_1 = U_3 A_3$$

$(\Delta t)_m$ = temperatura media apropiada para obtener el flujo de calor para el intercambiador.

Para cada tipo de intercambiador existe determinada expresión para $(\Delta t)_m$, por lo que es necesario examinar ligeramente los diferentes tipos de intercambiadores.

En la figura 4.13a se da esquemáticamente un intercambiador; en él un fluido caliente a temperatura constante cede calor a un fluido frío, elevándole la temperatura.

En la figura 4.13b se ilustra el intercambio típico de una caldera; un fluido frío, a temperatura constante, recibe el calor de un fluido caliente que sufre enfriamiento.

En la figura 4.13c se da un intercambiador de fluidos paralelos; en él dos fluidos se mueven en la misma dirección y los dos sufren cambio de temperatura.

Finalmente, en la figura 4.13d tenemos un intercambiador de calor de fluidos encontrados. Los dos fluidos llevan dirección opuesta y ambos sufren cambio de temperatura.

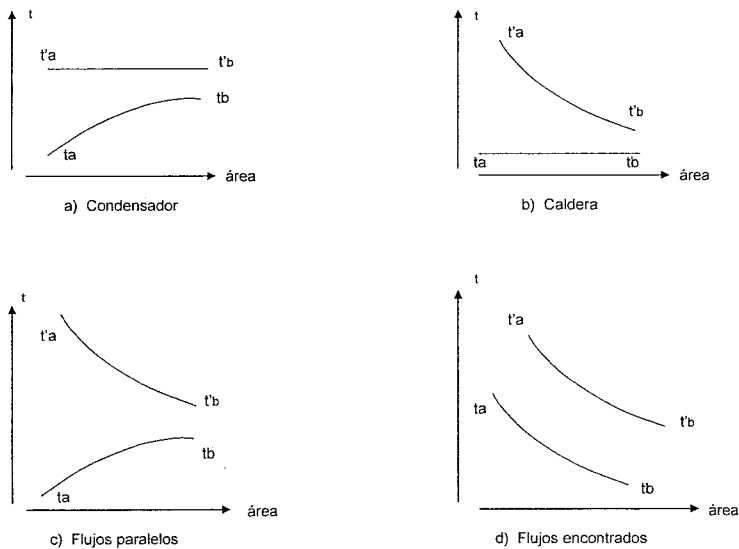


Fig. 4.13

Notación:

t_a = temperatura de entrada del fluido frío

t_b = temperatura de salida del fluido frío

t'_a = temperatura de entrada del fluido caliente

t'_b = temperatura de salida del fluido caliente

En los intercambiadores vistos no existe mezclado de ambos fluidos y se ha llamado “caliente” al fluido de mayor temperatura, sin que el llamarlo así signifique necesariamente que presente tal cualidad. Lo mismo se aplica al fluido “frío”.

Existen intercambiadores en los que los dos fluidos forman ángulos entre sí. En otros flujos se mezclan, etc.

Posiblemente, el tipo de intercambiador de más amplio uso es aquel en que el fluido exterior va por dentro de una carcasa que encierra varios pasos de tubos; es decir, el fluido por el interior de los tubos cambia 180° de dirección una o más veces en el interior de la carcasa.

Encontramos la expresión para la temperatura media de la ecuación (4.25) para un intercambiador de fluidos paralelos.

Si hacemos el análisis para un diferencial de área de caldeo dy tendremos, en estado permanente:

$$\text{Calor que pierde el fluido caliente } dq_1 = -m_1 c_1 dt' = dq$$

$$\text{Calor que gana el fluido frío } dq_3 = m_3 c_3 dt = dq$$

Donde:

m_1, m_3 = gastos máscicos de los fluidos caliente y frío, kg/seg

c_1, c_3 = coeficiente de capacidad calorífica, kcal/°C, - kg

Si consideramos que U es constante para toda la longitud del intercambiador

$$dq = Udy(t' - t) \quad (4.26)$$

Combinando las tres ecuaciones anteriores, encontramos la ecuación diferencial del sistema

$$\frac{d(t' - t)}{t' - t} = -U \left(\frac{1}{m_1 c_1} + \frac{1}{m_3 c_3} \right) dy \quad (4.27)$$

Con las siguientes condiciones de frontera:

$$\text{i) para } y = 0 \text{ (entrada) } \quad t' - t = t'_a - t_a \quad (4.28)$$

$$\text{ii) para } y = A \text{ (salida) } \quad t' - t = t'_b - t_b$$

Resolviendo la ecuación (4.27) y sustituyendo las condiciones de frontera, resulta

$$\ln \frac{t'_b - t_b}{t'_a - t_a} = -UAN \quad (4.29)$$

Con

$$N = \frac{1}{m_1 c_1} + \frac{1}{m_3 c_3} \quad (4.30)$$

De la ecuación (4.25)

$$q = UA (\Delta t)_m \quad \text{despejamos } (\Delta t)_m$$

$$(\Delta t)_m = \frac{q}{UA} \quad (4.31)$$

$$(\Delta t)_m = \frac{q}{UA} \quad (4.31)$$

q es también el calor total perdido por el fluido caliente y es, así mismo, el calor ganado por el fluido frío.

$$q = m_1 c_1 (t'_a - t'_b) = m_3 c_3 (t_b - t_a) \quad (4.32)$$

Combinando las últimas ecuaciones

$$(\Delta t)_m = \frac{(t'_a - t_a) - (t'_b - t_b)}{\ln \frac{t'_a - t_a}{t'_b - t_b}} \quad (4.33)$$

Llamaremos a dicha $(\Delta t)_m$ diferencia media logarítmica de temperatura y nos referimos a ella de ahora e adelante como $(\Delta t)_m$. La ecuación (4.33) da la diferencia media logarítmica para un intercambiador de flujos paralelos; una formula más general, que sirve para intercambiadores tanto de flujo paralelos como de flujos encontrados, es la siguiente

$$(\Delta t)_m = \frac{(\Delta t)_{\max} - (\Delta t)_{\min}}{\ln \frac{(\Delta t)_{\max}}{(\Delta t)_{\min}}} \quad (4.34)$$

Donde

$(\Delta t)_{\max}$ = La mayor diferencia entre los dos fluidos que exista en cualquiera de los dos extremos del intercambiador

$(\Delta t)_{\min}$ = La menor diferencia de temperatura entre los dos fluidos

La ecuación (4.34) sirve para intercambiadores de un paso. Diferentes investigadores han encontrado factores de corrección para intercambiadores de uno o más pesos de carcaza, con varios pares de pasos de tubos, es decir:

$$(\Delta t)_m = R \frac{(\Delta t)_{\max} - (\Delta t)_{\min}}{\ln \frac{(\Delta t)_{\max}}{(\Delta t)_{\min}}} \quad (4.35)$$

R = factor de corrección; depende del número de carcaza y del número de pasos, adimensional

4.8 Caldera de evaporación industrial

Una caldera de vapor es una unidad de proceso de gran importancia en todo tipo de industrias. En general, en una industria, el vapor se utiliza como:

- ♣ Medio de calefacción directa o indirecta.
- ♣ Materia prima.
- ♣ Medio de obtención de energía eléctrica en procesos de cogeneración

Las calderas de vapor, presentes en gran número de industrias, están formadas por una serie de elementos interrelacionados entre si que constituyen un sistema complejo. Como referencia para obtención del modelo se ha tomado una caldera de vapor industrial real de una industria azucarera.

Se obtendrá el modelo matemático dinámico que represente el comportamiento de una caldera

FUNCIONAMIENTO DE UNA CALDERA DE VAPOR

El objetivo de funcionamiento de una caldera es la obtención de vapor de agua y su posterior sobrecalentamiento utilizando como medio calefactor la energía liberada en una reacción de combustión.

La caldera de vapor elegida como base para el modelado funciona de la siguiente manera Figura 4.14

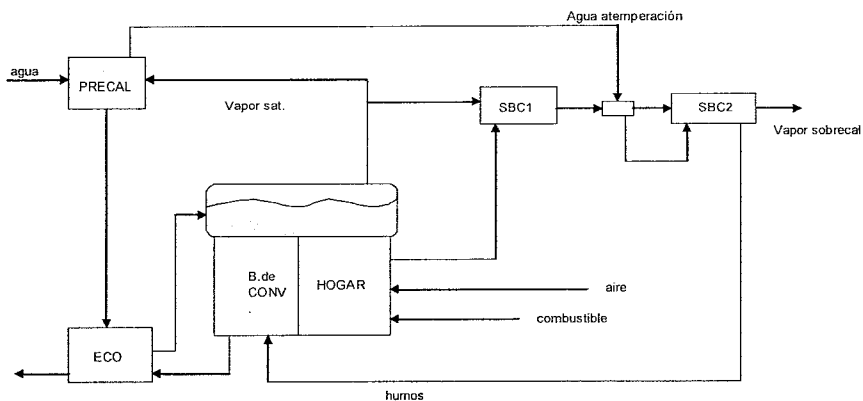


Fig. 4.14

Según se aprecia en el esquema de la figura 4.14 el agua de alimentación pasa inicialmente por un intercambiador de calor cuyo objetivo es el precalentamiento de agua antes de que

ésta entre en el economizador. Como medio calefactor se utiliza vapor de agua saturado que se obtiene en la propia caldera.

En el economizador el agua se sigue calentando, aunque sin llegar a vaporizarse, utilizando ahora los gases generados en la reacción de combustión como fluido calefactor.

Después del economizador el agua llega al calderón superior (también llamado calderón de vapor), y desde allí, mediante los tubos bajantes accede al calderín inferior (o calderín de agua), desde donde se reparte entre los distintos circuitos de evaporación de agua situados en la cámara de combustión y el banco de convección.

Los mecanismos principales de transmisión de calor en cada sección son respectivamente la radiación y la convección.

El agua, al ascender por los tubos (por circulación natural) se va vaporizando en parte, formando una mezcla de vapor y agua al llegar de nuevo al calderón superior. Este calderín superior. Este calderín dispone de un sistema de separadores ciclónicos par recoger el agua que puede ser arrastrada por el vapor.

El vapor seco que sale del calderín llega a la sección de sobrecalentamiento, formada por dos cuerpos separados por un alternador. Al salir del sobre calentador secundario, el vapor llega a un colector desde donde ya pasa a proceso.

La caldera que se ha elegido como base para la obtención del modelo matemático, obtiene vapor sobrecalentado a 40 bares y 380° C a partir de agua a 120° C y utilizando como combustible un gas natural de poder calorífico inferior igual a 9100 kcal/m³N.

Modelo Físico Matemático

Para llevar a cabo el modelado de la caldera de vapor de forma sencilla se la ha dividido en los distintos elementos que la componen, modelándose cada uno de ellos por separado; de tal forma que su posterior unión nos permita simular el comportamiento global de la caldera.

Los elementos principales considerados son:

- Hogar de combustión
- Banco de convección
- Sobrecalentador primario y secundario
- Atemperador
- Economizador
- Precalentador de agua
- Calderin de vapor y caderín de agua
- Conductos y tuberías
- Chimenea
- Ventilador

El modelado de cada unidad está basado en leyes de conservación de materia energía cantidad de movimiento, buscando siempre un compromiso entre la representación fidedigna del proceso real y la complejidad matemática derivada de la misma. Compromiso que puede traducirse en la consideración de determinadas suposiciones y cálculos de ciertos parámetros.

De forma genérica, las leyes de conservación pueden traducirse matemáticamente como:
Balance de materia:

$$\frac{dM}{dt} = W_{\text{entrada}} - W_{\text{salida}} + W_{\text{generación}} - W_{\text{consumo}} \quad (4.36)$$

Balance de energía

$$\frac{d(M * H)}{dt} = W * H_{\text{entrada}} - W * H_{\text{salida}} + Q_{\text{absorbido}} - Q_{\text{cedido}} \quad (4.37)$$

Transmisión de calor

$$Q = U * S * (\Delta T_m) \quad (4.38)$$

Balance cantidad de movimiento (Ec. Bernouilli)

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + z_1 + \frac{u_1^2}{2 \cdot g} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + z_2 + \frac{u_2^2}{2 \cdot g} + hf \quad (4.39)$$

Donde ΔT_m (diferencia media de temperaturas), H (entalpía específica), hf (perdidas de carga), P (presión), Q (flujo d calor), S (superficie efectiva de intercambio de calor), U (coef. Global de transmisión de calor), W (flujo másico), z (altura), ρ (densidad).

Estas ecuaciones se utilizan para el modelado de todas las unidades que componen la caldera, particularizándolas para cada caso concreto.

4.9 Turbina de vapor

La figura representa el diagrama de bloques de una micro turbina, junto con sus sistemas de control y combustible.

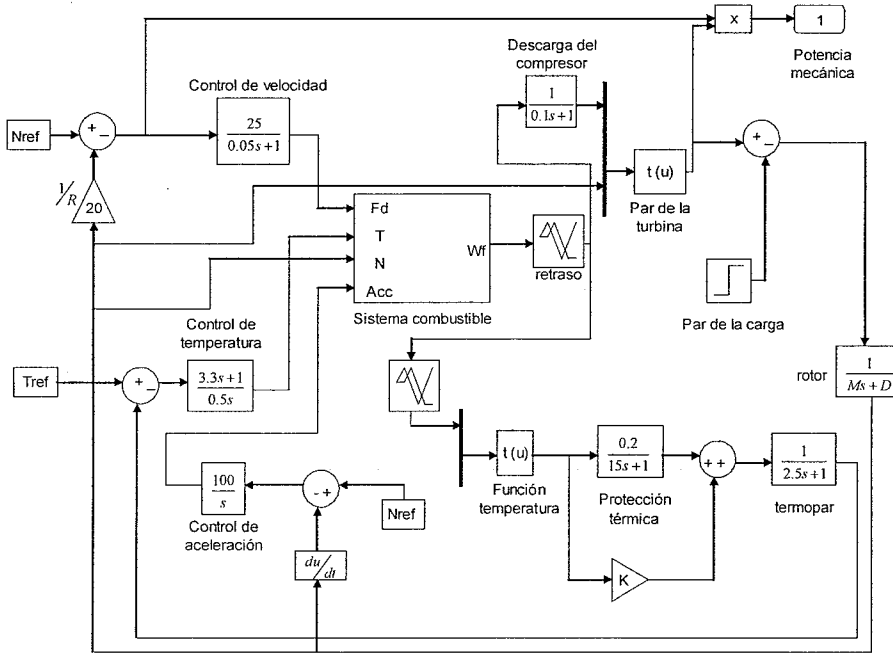


Fig.4.15

El sistema de control incluye el control de la velocidad, el control de la temperatura, y los límites de combustible superior e inferior. El regulador de error es un controlador de velocidad en donde la salida es proporcional al error de velocidad. El regulador de error es el medio primario de controlar la micro turbina bajo condiciones de carga parcial. Una consigna digital es la forma normal de controlar la salida de la micro turbina en paralelo y utiliza un regulador de error.

El control de temperatura es la manera común de limitar la salida de la Micro turbina a una temperatura predeterminada que depende de la variación en la temperatura ambiente o características de combustible. Puesto que la temperatura de salida se mide usando una serie de termopares que incorporan pantallas de protección a la radiación, existe un pequeño error transitorio debido a las constantes de tiempo asociadas con los sistemas de medida. Bajo condiciones normales del sistema, donde la salida de la micro turbina se determina por el valor lento de la consigna digital, estas constantes de tiempo no son significativas para la función de limitación de la carga. Sin embargo, cuando el incremento en la salida de la micro turbina es el resultado de la reducción de la frecuencia del sistema y por lo tanto

puede ocurrir rápidamente, las constantes de tiempo del sistema de medida de la temperatura de salida causará, un transitorio en la respuesta a la carga. El diseño de este controlador de temperatura tiene como fin compensar este pico transitorio.

Ecuación del consumo de potencia en el compresor:

$$P_C = \frac{w_a \Delta h_{1C}}{\eta_c \eta_{trans}} \quad (4.40)$$

Balance energético en la combustión:

$$w_g c_{pR} (T_{Tm} - 298) + w_f \Delta h_{25} + w_a c_{pa} (298 - T_{cout}) + w_{is} c_{ps} (298 - T_{is}) = 0 \quad (4.41)$$

Ecuación de la potencia:

$$P_T = \eta_T w_g \Delta h_{IT} \quad (4.42)$$

$$P_m = P_T - P_c \quad (4.43)$$

El sistema del combustible consta de la válvula de combustible y el actuador. La salida de combustible y el actuador. La salida de combustible depende de la inercia del actuador del sistema de combustible y del posicionador de la válvula.

Ecuación del actuador del sistema de combustible:

$$w_f = \frac{k_f}{\tau_f s + 1} e_1 \quad (4.44)$$

Ecuación del posicionador de la válvula:

$$e_1 = \frac{a}{bs + c} F_d \quad (4.45)$$

4.10 Reactor químico

El sistema de reactor químico se muestra en la figura 4.16

Este tiene como objetivo controlar la composición química de una acción química de dos elementos A y B.

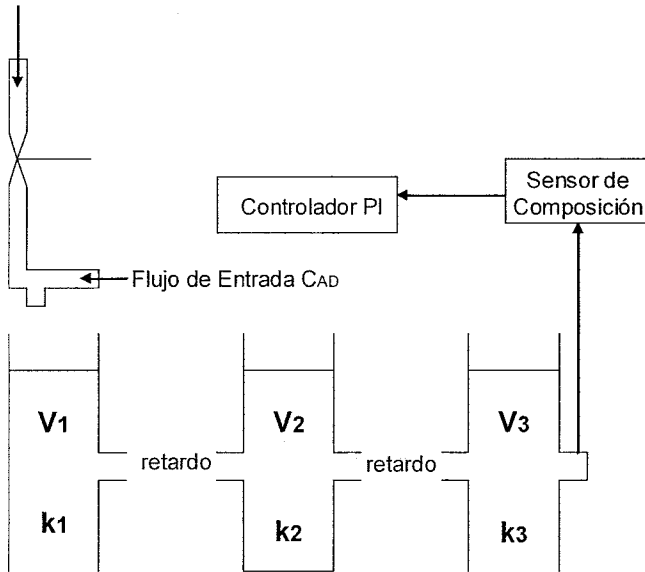


Fig.4.16

El modelo matemático se obtiene de la siguiente manera

- Aplicar balances de masa de cada uno de los reactores. Considerando que $V_1 = V_2 = V_3 = V$ y son constantes, por el principio de conservación de masa, se tiene que el flujo F es también constante, es decir, $F_0 = F_1 = F_2 = F_3 = F$.
- Aplicar las ecuaciones de continuidad para cada uno de los elementos:

$$\frac{d(V_1 C_{A1})}{dt} = F_0 C_{A0} - F_1 C_{A1} - V_1 k_1 C_{A1} \quad (4.46)$$

$$\frac{d(V_2 C_{A2})}{dt} = F_1 C_{A1} - F_2 C_{A2} - V_2 k_2 C_{A2} \quad (4.47)$$

$$\frac{d(V_3 C_{A3})}{dt} = F_2 C_{A2} - F_3 C_{A3} - V_3 k_3 C_{A3} \quad (4.48)$$

Donde C_{A_i} representa la composición del elemento A en cada reactor químico, k_i es la razón de reacción específica. Al aplicar la suposición del inciso a) a las ecuaciones de continuidad, se obtiene:

$$\frac{d(C_{A1})}{dt} + \left(K_1 + \frac{1}{a} \right) C_{A1} = \frac{1}{a} C_{A0} \quad (4.49)$$

$$\frac{d(C_{A2})}{dt} + \left(K_2 + \frac{1}{a} \right) C_{A2} = \frac{1}{a} C_{A1} \quad (4.50)$$

$$\frac{d(C_{A3})}{dt} + \left(K_3 + \frac{1}{a} \right) C_{A3} = \frac{1}{a} C_{A2} \quad (4.51)$$

Donde $a = V/F$. Como la composición de C_{A1} y C_{A2} que alimentan el segundo tercer reactor no están disponibles en forma instantánea ya que es necesario transportarlos a través de la tubería, se tiene que considerar la presencia de retardos en el modelo matemático. Al realizar esta consideración y suponiendo que sin perdida de generalidad se puede considerar que las condiciones iniciales son iguales a cero, de esa forma obtenemos que la función de transferencia de cada reactor esta dada por

$$\frac{C_{A1}(s)}{C_{A0}(s)} = \frac{1/a}{s + (k_1 + 1/a)} \quad (4.52)$$

$$\frac{C_{A2}(s)}{C_{A1}(s)} = \frac{1/a}{s + (k_2 + 1/a)} e^{-s\tau} \quad (4.53)$$

$$\frac{C_{A3}(s)}{C_{A2}(s)} = \frac{1/a}{s + (k_3 + 1/a)} e^{-s\tau} \quad (4.54)$$

El diagrama de bloques del sistema formado por los tres reactores, incluyendo el controlado PI, se muestra en la figura 4.17

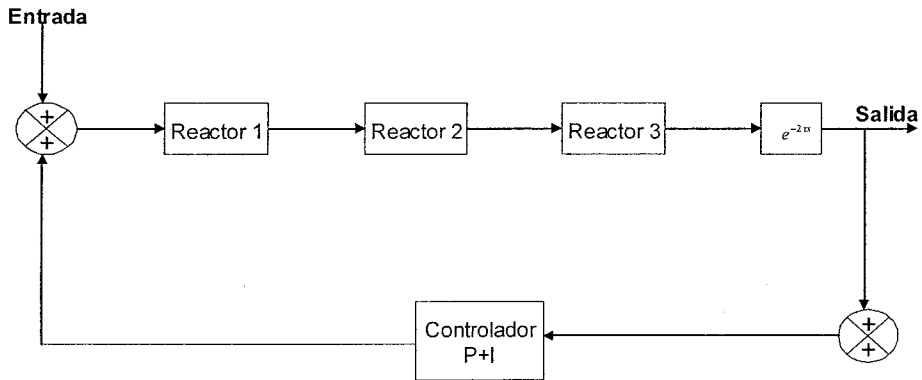


Fig. 4.17

La ecuación característica del sistema de la figura 4.17 esta dada por

$$p(s, e^{-2s}) = 0.2s^4 + 1.26s^3 + 4.054s^2 + 3.51s + (4s + 1)e^{-2s} \quad (4.55)$$

4.11 Torres de destilación

La capacidad de un sistema de control de destilación eficaz tendiente a reducir el costo de los equipos, incrementar la capacidad o lograr la recuperación del componente clave, ya se conoce de una manera muy adecuada. Aún cuando las columnas de destilación forman parte principal de diversos procesos, cada una de ellas tiene un conjunto específico de objetivos de operación y restricciones. Esta es la razón que determina que ningún sistema de control de destilación sea universal.

El objetivo principal de cualquier sistema de control para un proceso es la estabilidad. Cuando la estabilidad se relaciona a la operación de una columna de destilación, se hace referencia a la capacidad que el sistema tiene para prevenir perturbaciones que puedan resultar de cambios en las variables independientes a las que se sujeta la operación. En la tabla 4.1 se proporciona una lista de las variables más comunes que afectan la operación de una columna de destilación.

Variables de entrada (independientes)		Variable de salida (dependiente)
No controlada	Manipulada	
Composición de la alimentación	Relación de reflujo	
Velocidad de alimentación	Índice de ebullición	
Entalpía de alimentación	Velocidad de destilado	
Temperatura del reflujo	Velocidad de fondos	Composición del destilado
Entalpía del medio de calentamiento	Presión de la columna	Composición de fondos

Fig. 4.1

La operación más estable de una columna de destilación se tiene cuando se manipulan independientemente el producto obtenido y la energía suministrada (o extraída), de manera que se pueda producir la separación específica. Para lograr esto se requiere el establecimiento de la velocidad de flujo en un valor tal que se mantenga el balance de materiales. Posteriormente, se manipula el reflujo o el calor, a fin de regular la cantidad de energía que reside en el proceso.

En la figura 4.18 se muestra uno de los sistemas más comunes de control de columnas de destilación.

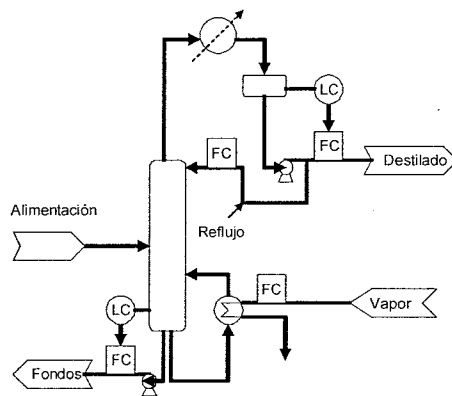


Fig. 4.18

Nótese que los productos de destilado y fondos se establecen a velocidades en las que es posible mantener un nivel en el acumulador de condensando y la base de la columna, respectivamente. Este arreglo de control promueve cierta inestabilidad, ya que las velocidades de flujo de destilado llegar a ser función de la continuidad de energía que se encuentra en el sistema. Las perturbaciones de energía ocasionadas por cambios en la

alimentación, las entalpías del medio de calentamiento y la velocidad de flujo de la alimentación tendrán un efecto en la distribución de productos. Se llega a tener grandes variaciones en la calidad de los productos para sistemas operados bajo este tipo de control, puesto que la calidad de los productos es muy sensible a la distribución de los mismos.

Cuando la columna se opera con perturbaciones, la recuperación es lenta porque el operador se ve obligado a manipular el reflujo y la energía suministrada de manera independiente, con objeto de tratar de cumplir los requisitos de calidad del producto. Esta situación crea complicaciones en la operación, si se tiene en cuenta que la cantidad de energía requerida para producir una separación determinada es función de muchas variables, cada una de las cuales debe ser considerada por el operador.

En la figura 4.19 se representan dos sistemas básicos de control para columnas de destilación aceptables.

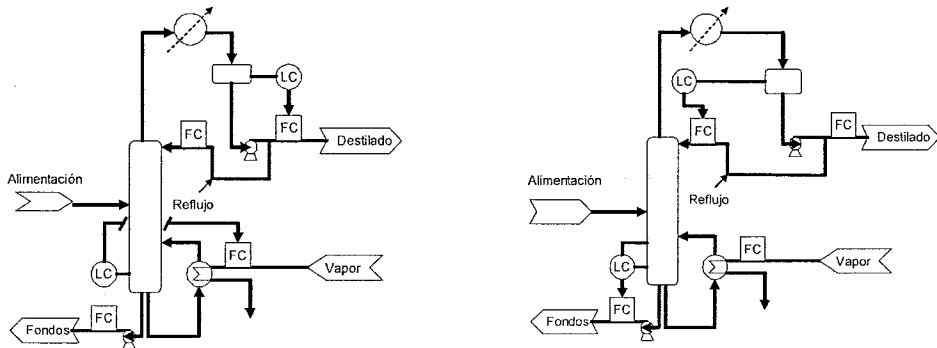


Fig. 4.19

Nótese que en cada sistema se manipulan las velocidades de flujo del destilado y el fondo de manera directa para producir la distribución requerida de productos (por ejemplo control del balance de materiales). El reflujo es la variable manipulada para controlar la energía, cuando el producto de fondo se establece a partir del balance de materiales de esta forma, el calor se manipula para controlar la energía cuando el destilado se establece con respecto al balance de materiales.

Los sistemas de control más preferidos tienden a ser autorregulables. Por ejemplo, las perturbaciones en la entalpía del medio de calentamiento se detectan mediante el control del nivel, que proporciona la compensación requerida cuando se manipula la corriente de fondo para tener un control en el balance de materiales. Las variaciones en la velocidad de la corriente en fase vapor de la parte superior de la columna, que son resultado de cambios en el reflujo sub enfriado, se compensan de manera similar mediante el controlador de nivel del acumulador de condensado cuando el producto destilado se establece para el control del balance de materiales.

En un sistema de control como el referido del operador se simplifica de manera sustancial ya que lo único que tiene que hacer es establecer el flujo de producto respecto al balance de materiales:

$$D = F(z - x^o)/(y^o - x^o) \quad (4.56)$$

$$B = F(y^o - z)/(y - x^o) \quad (4.57)$$

Donde:

D = velocidad de flujo destilado, unidades de masa

F = velocidad de flujo de la alimentación, unidades de masa

z = concentración del componente ligero clave en la corriente de alimentación, por ciento en peso

x^o = concentración especificada del componente ligero clave en la corriente de fondo, por ciento en peso

y^o = pureza del producto especificada en la corriente de destilado, por ciento en peso

B = velocidad de flujo de la corriente de fondo, unidades de masa

Y después forzar el sistema para obtener la separación deseada a través de la manipulación de flujo o el calor suministrado cuando se cuenta con una distribución de producto especificada con anterioridad. Los ajustes que debe realizar el operador son mínimos, ya que se reduce considerablemente el grado de interacción de la variable mediante el sistema de control adecuadamente dispuesto.

El producto más adecuado para la manipulación del sistema es aquel con la menor velocidad de flujo, si no existe otra razón que la exactitud; el mismo error relativo de medición producirá menos perturbaciones en el balance de materiales. Otras variables que pueden considerarse son la relación del reflujo y la dinámica del hervidor, sobre todo cuando se desea manipular el producto de fondo con métodos de balance de materiales.

Las variaciones en el calor suministrado para la destilación crean inestabilidad puesto que se ocasionan variaciones en las velocidades internas de flujo de líquido y vapor.

Por ejemplo, las variaciones en la temperatura del reflujo afectan el flujo interno de líquido descendente. Un método que ha demostrado su eficacia en la eliminación de estas perturbaciones consiste en incorporar a la columna un controlador de reflujo interno de propósito especial; el objetivo es mantener el flujo de líquido descendente desde el plato superior a una velocidad específica. La siguiente ecuación de control se deriva de los balances materiales y energía en estado estacionario alrededor del plato superior:

$$Ri = Re[1 + K^o(T_{ov} - T_{re})] \quad (4.58)$$

Donde:

Ri = velocidad de reflujo interno, unidades de masa

Re = velocidad de reflujo externo, unidades de masa

K = constante de reflujo interno, C_p/H , donde C_p = calor específico de líquido en el plato superior y H = calor de evaporización del líquido en el plato superior.
 T_{ov} = temperatura del vapor en la parte superior de la columna
 T_{re} = temperatura de la corriente de reflujo externo

En las figuras 4.20 se ilustran dos métodos en los cuales se puede utilizar esta ecuación

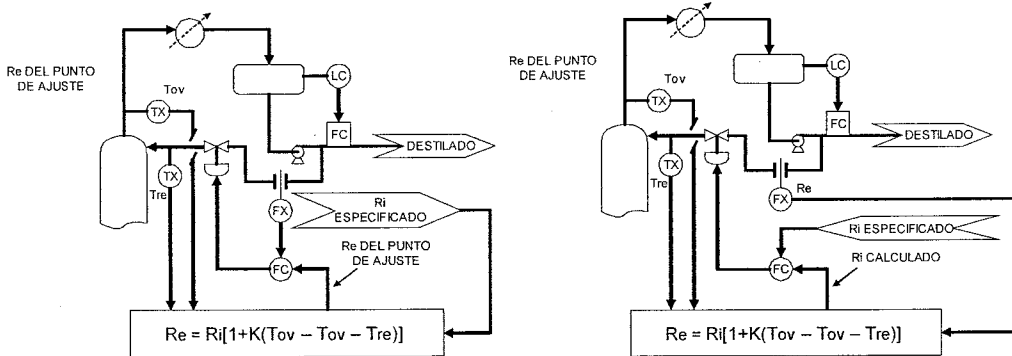


Fig. 4.20

Otra perturbación en el calor suministrado a la columna la causan las variaciones en la entalpía del medio de calentamiento. Son comunes las ondas o variaciones de presión en los sistemas de suministro de vapor y las variaciones en la calidad de vapor, pudiendo ocasionar trastornos en la operación de destilación. La ecuación de controles

$$H = (a_0 + a_1 \circ P_s + a_2 \circ T_s) - (a_3 + a_4 \circ T_r) \quad (4.59)$$

donde H = vapor al hervidor, ΔH

a_0, a_1, \dots = constantes de la ecuación de regresión

- P_s = presión del vapor suministrado al hervidor
- T_s = temperatura del vapor suministrado al hervidor
- T_r = temperatura de referencia

El resultado de esta ecuación se utiliza en un sistema de control que establece la velocidad del medio de calentamiento en forma compensada para estas perturbaciones.

4.12 Destilación batch

El reciente aumento en la producción de pequeños volúmenes de sustancias químicas con un alto valor agregado ha renovado el interés en las técnicas de separación y purificación de productos.

Los procesos de separación se pueden operar en forma continua o en lotes (batch). La operación batch es particularmente atractiva gracias a su flexibilidad, la cual permite procesar mezclas donde existen grandes variaciones en las composiciones de la alimentación, operar con mezclas diferentes y obtener distintos productos en el mismo equipo y responder de manera más eficiente a los cambios en la demanda. Por otro lado, esta flexibilidad unida a la naturaleza no – estacionaria propia de la operación batch, incrementa las dificultades a la hora de resolver el modelo matemático del proceso.

La evaporación simple, o destilación diferencial, es uno de los procesos de separación batch mas antiguamente utilizados. Su efectividad esta condicionada a que la volatilidad relativa de la mezcla a separar sea elevada.

El reciente interés en este tipo de procesos se ha traducido en el desarrollo de nuevas estrategias de modelado y simulación junto con un aumento den el número de publicaciones relacionadas con este tema.

La metodología de modelado orientado a objetos desarrollada en los últimos años, ha demostrado ser muy efectiva en la solución de los problemas y limitaciones que presentan las técnicas de simulación consideradas clásicas hasta el día de hoy. Esta metodología incorpora la mayoría de las ideas básicas de la programación orientada a objetos con el objetivo principal de posibilitar la reutilización de modelos predefinidos en la construcción de nuevos modelos.

Una de las principales características del modelado orientado a objetos es el desarrollo estructurado de modelos, en el cual los modelos se componen de submodelos cada vez más simples. De esta manera, el modelo de un sistema se construye a partir de la interconexión de modelos que representan a los diferentes subsistemas que integran el sistema. Este procedimiento puede ser recursivo obteniéndose así modelos de sistemas cada vez más complejos en el sentido del número de componentes (subsistemas) que lo integran. La figura 4.21 ilustra este concepto, donde la relación de agregación representa la interconexión de los modelos.

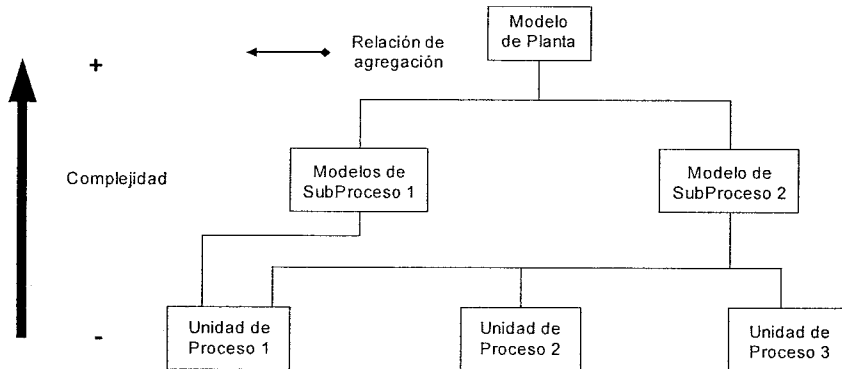


Fig. 4.21

Modelo del proceso

El modelo de proceso de evaporación se muestra en la figura 4.22. El sistema está constituido por un evaporador batch unido a una válvula proporcional que permite la salida del producto obtenido.

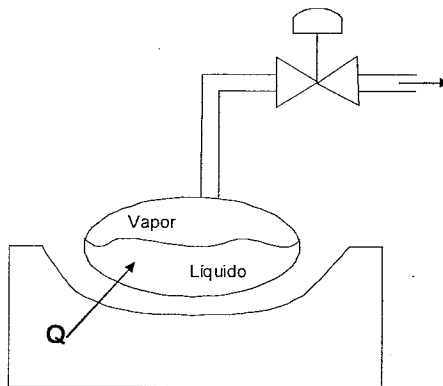


Fig. 4.22

En el desarrollo del modelo se incluyen los siguientes fenómenos:

- Balances de materia total
- Balances de componentes
- Balance de energía
- Relaciones físico-químicas entre las fases en equilibrio.

Aplicando el modelado orientado a objetos se ha descompuesto el proceso en subsistemas más sencillos de tratar en forma independiente. A partir de los principios físicos que rigen cada subsistema derivaremos los componentes que describen su comportamiento. Con esto buscamos aumentar la capacidad del modelo para ser reutilizado en diferentes contextos.

Descripción de las unidades de proceso

Una vez que se ha estructurado el sistema en subunidades es posible crear componentes que encapsulen el comportamiento de cada unidad de proceso Figura 4.23. Cada una de las unidades encapsula el siguiente conocimiento físico:

- Fenómenos representados en el modelo. Se incorporan de forma implícita las hipótesis establecida (temperatura uniforme, densidad constante, etc.)
- Las características físicas de los componentes (geometría, dimensión, etc.) quedan establecidas de manera explícita en los parámetros.

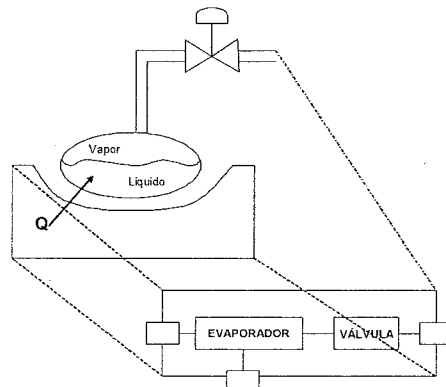


Fig.4.23

Componente Válvula

Con el objeto de minimizar el coste de desarrollo y mantenimiento de los modelos se propone establecer una jerarquía de componentes.

Identificando las características comunes a distintos sistemas es posible construir un componente abstracto que encapsule y represente el comportamiento común de diferentes subsistemas. En el caso de sistemas como una válvula o una tubería se observan características comunes tales como flujo constante, etc. Todas estas características se incluyen en un componente abstracto (canal), el cual es utilizado, a través de la herencia, para construir el modelo de la válvula o la tubería incluyendo la ecuación específica que describe su comportamiento.

Componente evaporador

El modelado riguroso de este tipo de procesos genera un conjunto de ecuaciones de alto índice, lo que dificulta su relación numérica. El problema de índice distinto de cero se presenta cuando variables cuyas dinámicas están descritas por una ecuación diferencial (potencialmente variables de estado del sistema) se encuentran a su vez ligadas mediante ecuaciones algebraicas. En el caso del evaporador esta variable es la entalpía de la mezcla, la cual depende de la temperatura del sistema.

A continuación se incluye la ecuación del sistema:

$$\frac{dN_i}{dt} = f_{out} \quad (4.60)$$

$$N_i \frac{dx_i}{dt} = -f_{out} \cdot (y_i - x_i) \quad (4.61)$$

$$N_i \frac{dH_i}{dt} = Q - f_{out} \cdot (H_v - H_i) \quad (4.62)$$

$$H_i = f(T, x_i) \quad (4.63)$$

Donde:

N_i : Moles líquidas de mezcla

f_{out} : Flujo de vapor producido por la evaporación

x_i : Fracción líquida del componente i

y_i : Fracción vapor del componente i

H_i : Entalpía líquida de la mezcla

H_v : Entalpía vapor de la mezcla

T: temperatura del sistema

Q: calor adicionado al sistema

Se puede observar que la entalpía líquida aparece como solución de la ecuación diferencial (4.62) y a su vez, se resuelve de forma explícita en la ecuación algebraica (4.63). Debido a que la ecuación (4.63) no es una expresión analítica.

Para resolver el problema del índice y al mismo tiempo el cálculo del flujo de vapor, se ha aproximado la derivada de la entalpía líquida en la ecuación (4.62) por medio de

$$-f_{out} = \frac{Q - N_l \cdot \Delta H_l}{(H_v - H_l)} \quad (4.64)$$

4.13 Control de cascada

Una de las técnicas para mejorar la estabilidad de un circuito complejo es el empleo del control en cascada. Su utilización es conveniente cuando la variable controlada no puede mantenerse dentro del punto de consigna, por óptimos que sen los ajustes del controlador, debido a las perturbaciones que se producen en alguna condición del proceso.

El empleo del control en cascada lo podemos ver en el siguiente ejemplo:

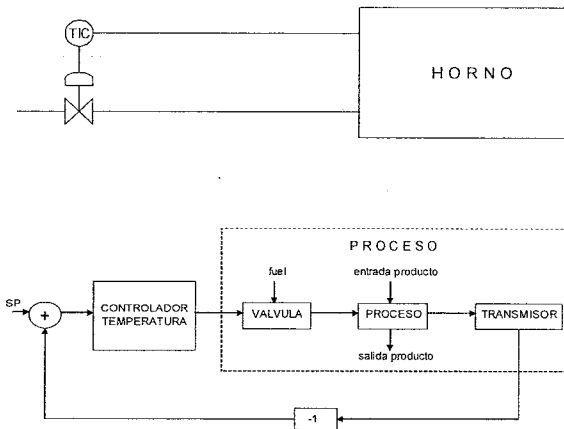


Fig. 4.24

La figura 4.24 muestra el control de temperatura de un horno. Cuando la temperatura medida se desvía del punto de consigna, el controlador varía la posición de la válvula de fue'l, y si todas las características del combustible (presión, viscosidad...) y del producto permanecen constantes, el control será generalmente bueno. Sin embargo, si una de las características, por ejemplo la presión, cambia de forma incontrolada, el caudal a través de la válvula seguirá la misma variación aunque su vástago permanezca fijo. Cambiará, pues la temperatura y, al cabo de un cierto tiempo dependiente de las características de capacitancia, resistencia y tiempo de transporte del proceso las variaciones de temperatura

llegará al controlador y éste reajustará la posición de la válvula de acuerdo con las acciones de que disponga. Será una causalidad que las correlaciones del controlador eliminen totalmente las perturbaciones en la presión del fuel, ya que estas son totalmente al azar y hay un retardo entre las mismas y el envío de la señal de corrección del controlador a la válvula. Por lo tanto, las continuas perturbaciones en la presión no sólo darán lugar a una corrección continua e innecesaria en la válvula, sino que perjudicarán el logro de una buena regulación pudiendo incluso impedir totalmente el control del proceso.

Nótese que el control de temperatura se realiza mediante la aportación del calor cedido por el fuel que pasa a través de la válvula, es decir, la temperatura es regulada más bien por el caudal de fuel (si la calida del fuel es constante) que por la posición del vástago de la válvula. Nótese que el caudal no está controlado, y que es de interés secundario (variable secundaria), pero es evidente que sus fluctuaciones afectan a la variable temperatura, la que necesariamente es de interés principal (variable primaria) en el control del proceso.

Desde el punto de vista de rapidez en el control del control del proceso sería muy conveniente el ajuste rápido de posición de la válvula tan pronto como se presenta una perturbación en la presión del fuel, mientras que las variaciones de temperatura más lentas que pueden producirse por otras causas deben ser corregidas para mantener la temperatura en el punto de consigna.

Si la señal de salida del controlador de temperatura (primario) actúa como punto de consigna de un instrumento que controle el caudal y cuya señal de salida ajuste la posición de la válvula, este segundo controlador (secundario) permitirá corregir rápidamente las variaciones de caudal provocadas por perturbaciones en la presión de fuel manteniendo el sistema en todo momento la capacidad para controlar la temperatura con el instrumento primario. Estos dos instrumentos conectados en serie actúan manteniendo la temperatura constante, el controlador de temperatura manda y el de caudal obedece. Esta disposición se denomina control, y puede verse en la figura 4.25 conjuntamente con su diagrama de bloques.

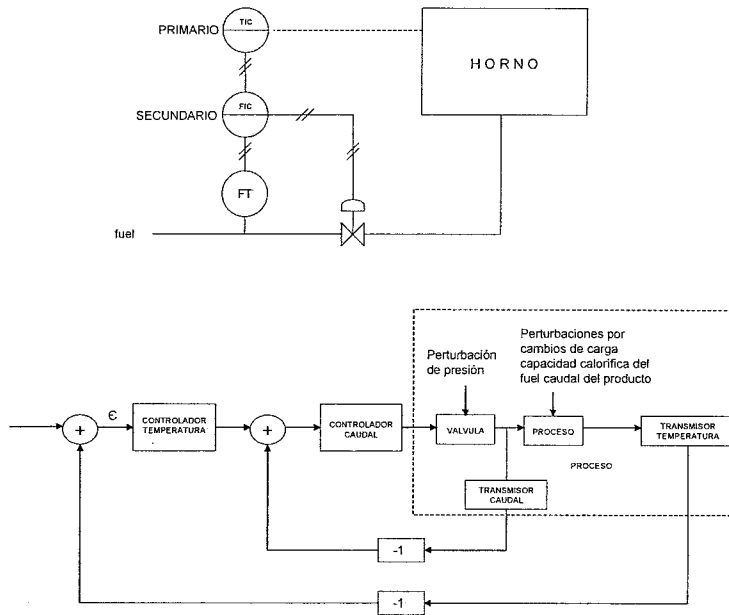


Fig. 2.25

Para que el control en cascada sea eficaz es necesario escoger adecuadamente la variable secundaria teniendo en cuenta las perturbaciones que pueden presentarse y las velocidades de respuesta de los distintos componentes del proceso. Para seleccionarla pueden seguirse los siguientes pasos:

1. Dibujar el diagrama a bloques del posible sistema en cascada.
2. El lazo secundario debe incluir la perturbación posible más importante.
3. El lazo secundario debe ser de respuesta rápida y para ello debe incluir los retardos mínimos del sistema de control. Como guía, la relación $\text{-- constante de tiempo de lazo principal/constante de tiempo de lazo secundario} = T_p/T_s$ debe ser como mínimo de 3, e idealmente de 5 a 10.
4. Los puntos de consigna de la variable secundaria deben estar relacionados directamente con los de la variable primaria y, a ser posible, su relación debe estar representada por una recta en preferencia a un línea curva. De este modo se simplificará el ajuste del controlador primario.
5. El lazo secundario debe contener el mayor número posible de perturbaciones mientras sea suficientemente rápido.
6. La variable secundaria seleccionada debe proporcionar una estabilidad el control secundario con la ganancia más alta que sea posible.

4.14 Control de relación

El control de relación es un sistema de control en el que una variable de proceso es controlada con relación a otra variable. Mientras que el control en cascada es sólo un método que mejora la regulación de una variable, el control de relación satisface una necesidad específica, el control de la relación entre dos cantidades.

Estas cantidades suelen ser caudales de fluidos, tal como puede verse en la figura 4.26.

La señal del transmisor de caudal es multiplicada por un factor fijado manual o automáticamente. La señal de salida del multiplicador es el punto de consigna del controlador cuya señal de salida actúa discretamente sobre la válvula de control.

Hay que señalar que el ajuste del relé de relación es función de los campos de medida relativos de los transmisores. Si en el ejemplo de la figura 4.26 el transmisor del caudal variable (sin controlar) tiene un campo de medida 1.5 veces mayor que el transmisor del caudal controlado y se desea que el caudal controlado este siempre en la proporción de 1: 2 con relación al caudal variable deberemos ajustar el dial del relé de relación en la posición:

$$\frac{1}{2} \times \frac{1.5}{1} = 0.75 \quad (4.65)$$

Por otro lado, los campos de medida de los transmisores deben estar expresados en las mismas unidades y es necesario considerar sus campos de control que influirán inevitablemente en la precisión de la relación entre las dos variables. En efecto, si los transmisores son cuadráticos con la “rangeability” 4:1 y hay que mantener una razón de 0.75 el controlador perderá su precisión cuando el caudal variable (primario baja por debajo de 0.25% de su campo de medida, lo que equivaldrá a que se pierda también la precisión si el caudal controlado (secundario) es inferior a 33% de su campo de medida, ya que el instrumento tiende a mantener su punto de consigna en $0.75 = \text{caudal primario} / \text{caudal secundario}$. Evidentemente $25\% \text{ señal salida transmisor primario} = \frac{25}{0.75} = 33,3\% \text{ señal de salida transmisor secundario} = 33,3\% \text{ secundario}$.

Una aplicación típica del controlador de relación se encuentra en la relación caudal aire/caudal fuel en la combustión de una caldera de vapor.

4.14 Control de relación

El control de relación es un sistema de control en el que una variable de proceso es controlada con relación a otra variable. Mientras que el control en cascada es sólo un método que mejora la regulación de una variable, el control de relación satisface una necesidad específica, el control de la relación entre dos cantidades.

Estas cantidades suelen ser caudales de fluidos, tal como puede verse en la figura 4.26.

La señal del transmisor de caudal es multiplicada por un factor fijado manual o automáticamente. La señal de salida del multiplicador es el punto de consigna del controlador cuya señal de salida actúa discretamente sobre la válvula de control.

Hay que señalar que el ajuste del relé de relación es función de los campos de medida relativos de los transmisores. Si en el ejemplo de la figura 4.26 el transmisor del caudal variable (sin controlar) tiene un campo de medida 1.5 veces mayor que el transmisor del caudal controlado y se desea que el caudal controlado este siempre en la proporción de 1:2 con relación al caudal variable deberemos ajustar el dial del relé de relación en la posición:

$$\frac{1}{2} \times \frac{1.5}{1} = 0.75 \quad (4.65)$$

Por otro lado, los campos de medida de los transmisores deben estar expresados en las mismas unidades y es necesario considerar sus campos de control que influirán inevitablemente en la precisión de la relación entre las dos variables. En efecto, si los transmisores son cuadráticos con la "rangeability" 4:1 y hay que mantener una razón de 0.75 el controlador perderá su precisión cuando el caudal variable (primario) baja por debajo de 0.25% de su campo de medida, lo que equivaldrá a que se pierda también la precisión si el caudal controlado (secundario) es inferior a 33% de su campo de medida, ya que el instrumento tiende a mantener su punto de consigna en $0.75 = \text{caudal primario} / \text{caudal secundario}$. Evidentemente $25\% \text{ señal salida transmisor primario} = \frac{25}{0.75} = 33,3\% \text{ señal de salida transmisor secundario} = 33,3\% \text{ secundario}$.

Una aplicación típica del controlador de relación se encuentra en la relación caudal aire/caudal fuel en la combustión de una caldera de vapor.

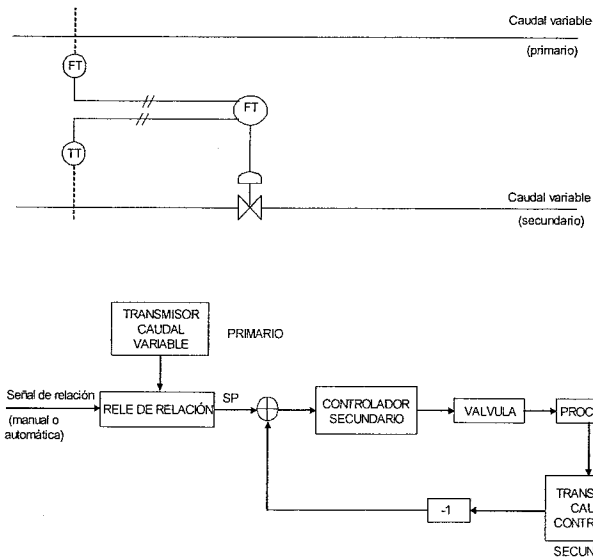


Fig. 4.26

4.15 Control de rango dividido

El control de rango dividido es una forma de control en el que una variable manipulada tiene preferencia con relación a otra u otras del proceso. En la figura (4.27) puede verse este tipo de control aplicado a dos intercambiadores de calor, en serie.

La instalación se utiliza para calentar un producto cuyo caudal es muy variable; cuando es bajo basta un solo intercambiador para calentarlo y cuando la fabricación es la máxima son necesarios los dos.

Suponemos que, desde el punto de vista de seguridad, las válvulas deben cerrar en caso de fallo de aire, por lo cual el controlador de temperatura deber ser de acción inversa (al aumentar la temperatura baja la señal de salida). Si el caudal de producto es bajo, actuará la válvula de vapor V-1 porque la señal de salida estará comprendida entre 50 – 100% (0-15psi). A medida que aumenta el caudal, el controlador de temperatura baja la señal gradualmente hasta que, cuando la señal baja de 50% (9psi), la válvula V-1 permanece totalmente abierta con el primer intercambiador trabajando al máximo y la válvula de control V-2 empieza a abrir iniciando el funcionamiento del segundo intercambiador. A un caudal máximo determinado, las dos válvulas de control están abiertas y los dos intercambiadores trabajan al máximo.

La partición de la señal se logra usualmente mediante posiciones o posicionadores acoplados a las válvulas de control que convierten el campo de la señal de entrada (0-50% o 50-100%) en todo el campo de variación estándar 3-15 psi.

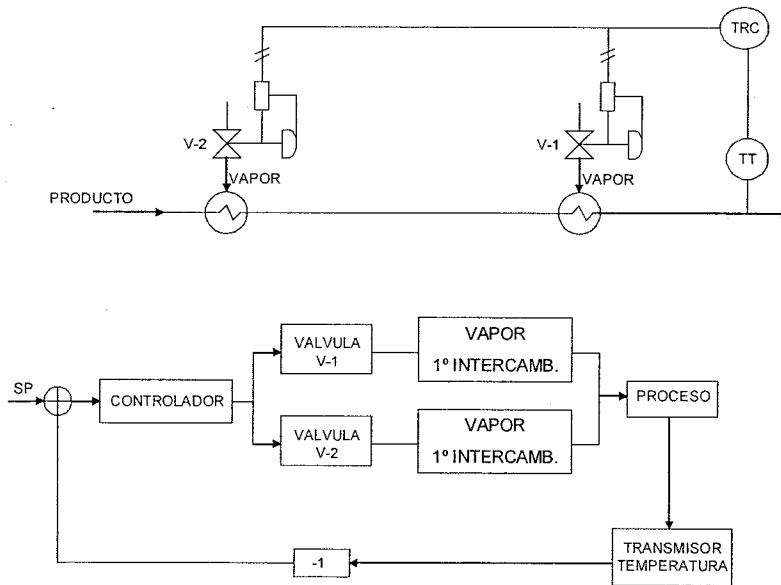


Fig. 4.27

4.17 Control anticipativo

El control de realimentación es la técnica más común empleada en el control de proceso. En este tipo de control la señal de salida (variable controlada) es comparada con un valor deseado (punto de consigna) y, la señal de error actúa sobre el controlador.

En sistemas que poseen tiempos de retardo importantes con desviaciones de magnitud y duración distintas, la señal de error es detectada mucho tiempo después que se ha producido el cambio de carga por lo cual la corrección correspondiente es retardada y ocurre a veces que actúa cuando ya no es necesaria porque se ha eliminado el cambio de carga que dio lugar a la corrección. Este problema puede resolverse en algunas aplicaciones introduciendo el control en cascada ya estudiado. El control en cascada es realmente un lazo de control secundario dentro de otro primario, con una respuesta suficientemente rápida establecida considerando que la relación entre las constantes de tiempo del lazo primario al secundario sea de tres o mayor. Por lo tanto, aunque el control en cascada sea suficientemente rápido ante perturbaciones de la variable secundaria no deja de tener el inconveniente de necesitar que se produzca una desviación antes de actuar, con el peligro de que solo responde rápidamente ante la variable secundaria sin que actúe del mismo modo ante variaciones en la variable primaria (por ejemplo el caudal o la temperatura del producto de entrada).

El control anticipativo (feed forward) parte de la medida de una o más variables de entrada y actúa simultáneamente sobre la variable manipulada que produce la salida deseada del proceso.

En la siguiente figura 4.28 puede verse una comparación entre controles de realimentación, en cascada y anticipativo aplicados a un típico intercambiador de calor.

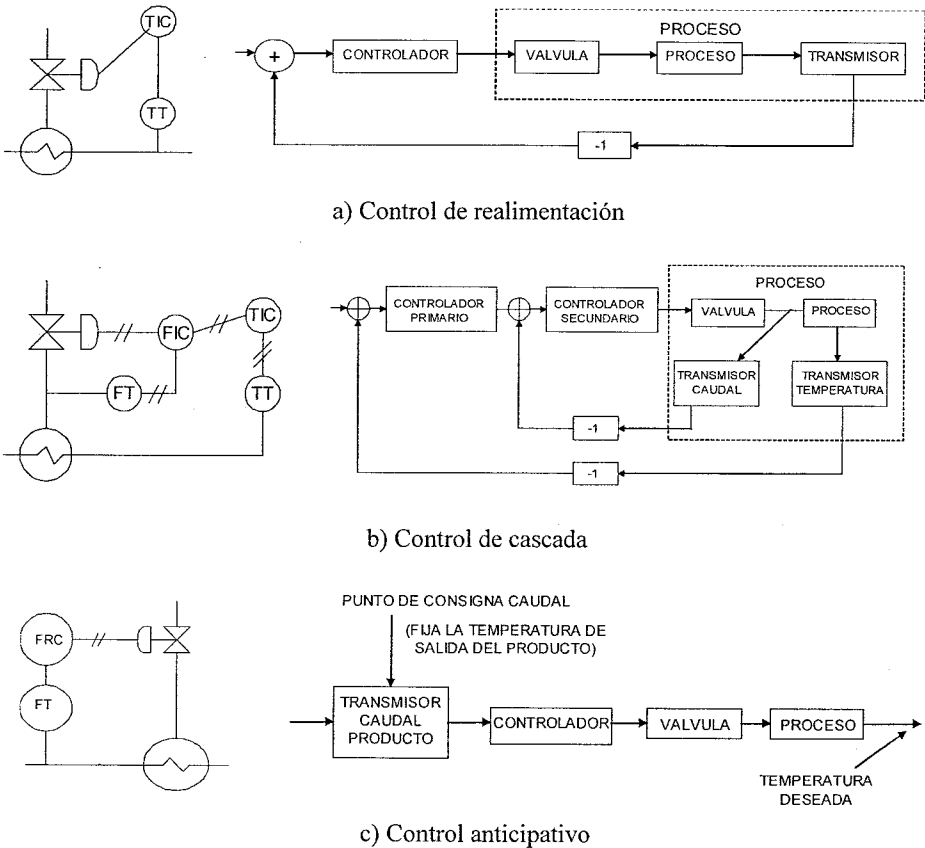


Fig. 4.28

El control anticipativo requiere un conocimiento exacto y completo de las características estáticas y dinámicas del proceso, en particular la relación entre el caudal del producto y la temperatura de salida, la influencia que tienen las perturbaciones en la presión del vapor, en la temperatura del producto de entrada, en el rendimiento del intercambiador, etc. Es decir, la relación entre la temperatura de entrada y el caudal de salida constituye un modelo del proceso y es la función de transferencia del sistema de control anticipativo. Evidentemente, el controlador es quien debe responder con esta función, pero como es lógico su eficacia depende de la precisión que se consiga en la medida de la variable de entrada y de la precisión alcanzada en el modelo calculado del proceso. Por otra parte, ha que señalar que es costoso y a veces imposible determinar y duplicar el modelo exacto del proceso. Por lo tanto siendo realmente un control en lazo abierto, su aplicación aislada dará lugar a un offset significativo, es decir, la temperatura de salida se apartará significativamente de la deseada.

En resumen puede afirmarse que el control de realimentación puede controlar bien en régimen permanente, pero no lo hace satisfactoriamente en condiciones dinámicas de funcionamiento del proceso. En cambio el control anticipativo es capaz de seguir rápidamente los cambios dinámicos, pero puede presentar un offset considerable en la variable de salida. Afortunadamente, las dos técnicas pueden combinarse para obtener un control dinámico sin offset, tal como puede verse en la figura 4.29

En esta figura el controlador anticipativo es de acción derivada; de este modo si el caudal es fijo la señal procedente del controlador de temperatura pasa sin cambios hacia la válvula. En cambio, si se presentan variaciones en el caudal, la señal derivada correspondiente se suma o se resta, según el sentido de la variación, a la temperatura. De este modo, los cambios de carga en el caudal del producto son detectados y corregidos inmediatamente y compensan los cambios anticipados que, por esta causa, pudieran producirse en la temperatura. Esta disposición recibe el nombre de “control anticipativo estático”

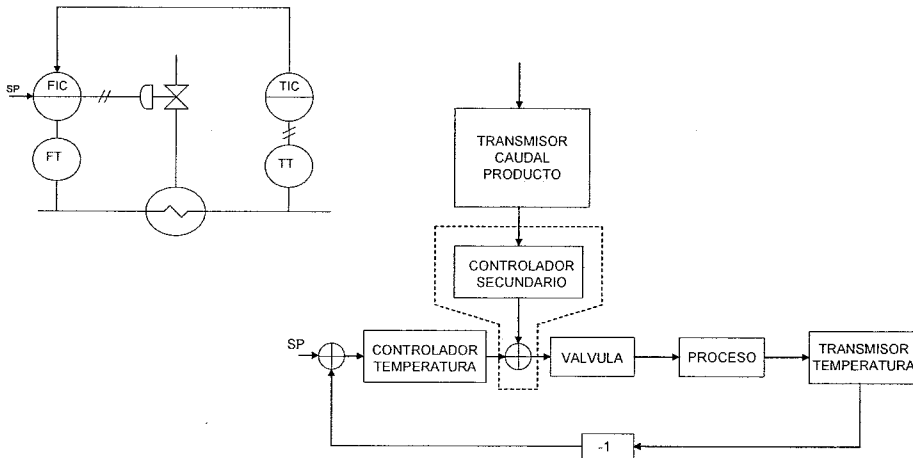


Fig. 4.29

El control anticipativo es útil en los siguientes procesos:

- a) Procesos con tiempos muertos y retardos considerables, difíciles o casi imposibles de controlar con el clásico control de realimentación (caso más frecuente de aplicación del control en adelanto).
- b) Proceso en los que la variable a controlar no puede medirse con precisión o de modo continuo
- c) Procesos en los que la variable a controlar no es fija y viene determinada por otra variable o variables que deben ser máximas o mínimas

4.18 Control prealimentado

El control de realimentación es una operación que en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida y la entrada de referencia de un sistema (o un estado deseado, arbitrariamente variado) y que lo hace sobre la base de esta diferencia. Aquí solamente se consideran perturbaciones a las no previsibles (es decir, las desconocidas de antemano) pues para las que pueden ser predichas o conocidas siempre se puede incluir una compensación dentro del sistema de modo que sean innecesarias las mediciones.

El sistema de control realimentado es aquel que tiende a mantener una relación preestablecida entre la salida y la entrada de referencia, comparando ambas y utilizando la diferencia como medio de control.

Es de notar que los sistemas de control realimentado no están limitados al campo de la ingeniería, sino que se los puede encontrar en áreas ajenas a la misma, como la economía y la biología. Por ejemplo un control de temperatura ambiente para una habitación. Midiendo la temperatura efectiva de la habitación y comparándola con la temperatura de referencia (temperatura deseada), el termostato conecta o desconecta los equipos de calefacción o refrigeración, de modo que la habitación se mantiene a una temperatura confortable, independientemente de las condiciones del exterior.

CAPITULO 5

CARACTERISTICAS DINAMICAS DE LOS PROCESOS INDUSTRIALES

Objetivo: Familiarizar al alumno con las características de comportamiento dinámico que con mayor frecuencia presentan los procesos industriales.

5.1 Características de primer orden y orden mayor

La forma canónica de un sistema de primer orden se ilustra en la figura 5.1

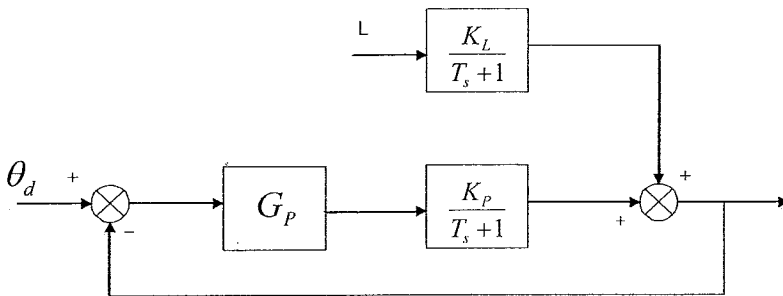


Fig. 5.1

Se ha eliminado el valor de ganancia del transmisor en la línea de retroalimentación con el fin de tener una retroalimentación; de tal modo, dicho valor multiplica al valor de ganancia del controlador, en la rama hacia delante.

En la figura anterior T es la constante de tiempo del proceso.

La constante K_L es la ganancia estática de la perturbación, en malla abierta. La ganancia estática del proceso K_p , relaciona los cambios de la variable de salida con los cambios de la salida del controlador, en forma permanente, cuando la línea de retroalimentación está abierta.

La función de transferencia para la perturbación es:

$$\frac{\theta}{L}(s) = \frac{\frac{K_L}{T_s + 1}}{1 + \frac{K_p G_c}{T_s + 1}} = \frac{K_L}{T_s + 1 + K_p G_c} \quad (5.1)$$

Donde:

G_c = ganancia del controlador multiplicada por la ganancia del transmisor.

Si se usa control proporcional⁷:

$$G_c = K_c K_t \quad (5.2)$$

Y definiendo:

$$K = K_c K_p K_t \quad (5.3)$$

La ecuación se convierte en:

$$\frac{\theta}{L}(s) = \frac{K_L}{1+K} \cdot \frac{1}{\frac{T}{1+K}s+1} \quad (5.4)$$

Si $L(s)$ es la transformada de Laplace de una función escalón unitario y T es la constante de tiempo en lazo cerrado, en tal forma que:

$$L(s) = \frac{1}{s}, \quad \text{y} \quad T = \frac{T}{1+K} \quad (5.5)$$

Entonces:

$$\theta(s) = \frac{K_L}{1+K} \cdot \frac{1}{s(Ts+1)} \quad (5.6)$$

Transformando inversamente esta ecuación; la respuesta en el tiempo, a la perturbación, será:

$$\theta(t) = \frac{K_L}{1+K} \left(1 - e^{-t/T} \right) \quad (5.7)$$

Respuesta en malla abierta.

Si se abre la línea de retroalimentación la función de transferencia de la perturbación es:

$$\frac{\theta}{L}(s) = \frac{K_L}{Ts+1} \quad (5.8)$$

⁷ Se definirá en el capítulo seis

Y la respuesta al escalón unitario será:

$$\theta(t) = K_L \left(1 - e^{-t/T} \right) \quad (5.9)$$

Comparando las ecuaciones 5.7 y 5.9 se observa que la retroalimentación produce un error estático final y una constante de tiempo $1 + K$ veces menor que los que presenta el proceso sin control.

Como el propósito es lograr que la variable de salida (nivel) no se altere con los cambios de la variable de perturbación (flujo de entrada), la respuesta con control es mucho mejor en comparación con la producida si este no existe. Puede concluirse que para controlar un proceso de primer orden basta usar control proporcional según sugiere la figura (5.2).

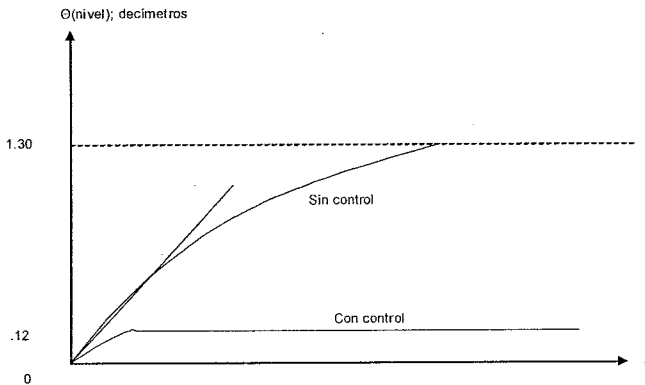


Fig. 5.2

Dé acuerdo con la ecuación 5.7 el error estático final depende inversamente del valor K_c , lo cual implica que debe usarse el máximo valor posible de K_c para minimizar dicho error. En la práctica no se puede aumentar el valor de K_c indefinidamente, pues otros pequeños retardos empezarían a entrar en juego, convirtiendo al sistema en inestable.

En la tabla 5.1 se indican las funciones de transferencia y respuesta transitoria de un sistema de primer orden para diferentes tipos de controlador. Nótese que la función de transferencia se convierte en una de segundo orden cuando se usa la acción I.

	$\frac{\theta(s)}{L}$		ERROR FINAL	w_n	ζ	A
P	$\frac{K_i T_c}{1+K} \frac{1}{\frac{T_c}{1+K} s+1}$	$\frac{K_i T_c}{1+K} [1 - e^{-t/T_c}]$	$\frac{K_i}{1+K}$			
I	$\frac{K_i T_c}{K_p} \frac{s}{\frac{T_c}{K_p} s^2 + \frac{T_c}{K_p} s+1}$	a) $0 < \zeta < 1$ $\frac{A w_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta w_n t} \text{sen}(w_n \sqrt{1-\zeta^2} t)$	0	$\sqrt{\frac{K_p}{T_c}}$	$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_c}{TK_p}}$	$\frac{K_i T_c}{K_p}$
PI	$\frac{K_i T_c}{K} \frac{s}{\frac{T_c}{K} s^2 + \frac{(1+K)T_c}{K} s+1}$	b) $\zeta = 1$ $A w_n^2 t e^{-w_n t}$ c) $\zeta > 1$	0	$\sqrt{\frac{K}{T_c}}$	$\frac{1}{2} \frac{1+K}{\sqrt{TK}}$	$\frac{K_i T_c}{K}$
PID	$\frac{K_i T_c}{K} \frac{s}{\frac{T_c(T_c+KT_D)}{K} s^2 + \frac{T_c(1+K)}{K} s+1}$	$\frac{A}{T_c - T_b} (e^{-T_b t} - e^{-T_c t})$ $T_c = \frac{1}{\zeta w_n - w_n \sqrt{\zeta^2 - 1}}$ $T_b = \frac{1}{\zeta w_n + w_n \sqrt{\zeta^2 - 1}}$	0	$\sqrt{\frac{K}{T_c(T_c+KT_D)}}$	$\frac{K+1}{2K} \frac{\sqrt{T_c}}{\sqrt{T_c+KT_D}}$	$\frac{K_i T_c}{K}$

Tabla 5.1

$$\theta(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} s \theta(s) = 0 \quad (5.10)$$

Lo que indica que la adición de acción integral lleva a un error final nulo, siempre que dicha acción no cauce inestabilidad; aunque el valor de la constante de tiempo de acción integral, T_i , tiene un fuerte efecto en la forma de la respuesta transitoria.

Procesos de segundo orden

La forma general de un sistema de control de un proceso de segundo orden se da en la figura 5.2 En este caso la perturbación puede entrar al circuito de control antes del primer elemento o entre el primero y el segundo. La tabla 5.2 contiene las funciones de transferencia para los dos tipos de perturbación y los diferentes controladores.

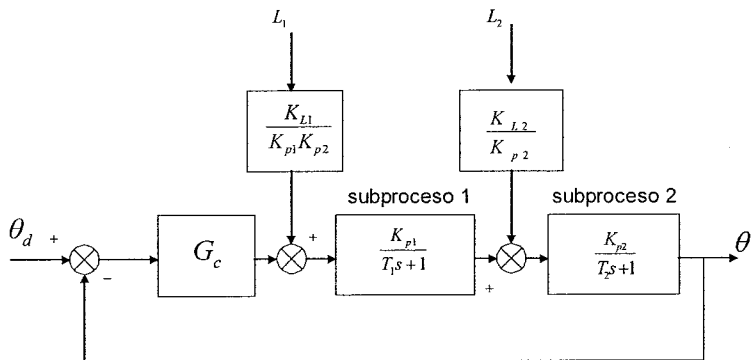


Fig. 5.3

Observando la tabla 5.3 se aprecia que el control proporcional y el proporcional más derivativo producen una función de transferencia de segundo orden y no aparece s en el numerador.

	$\frac{\theta}{L_1}(s)$	$\frac{\theta}{L_2}(s)$	ERROR DEBIDO A L1	FINAL DEBIDO A L2	ω_n	ζ
P	$\frac{K_{L1}}{K+1} \frac{1}{\frac{T_1 T_2}{K+1} s^2 + \frac{T_1 + T_2}{K+1} s + 1}$	$\frac{K_{L2}}{K+1} \frac{T_1 s + 1}{\frac{T_1 T_2}{K+1} s^2 + \frac{T_1 + T_2}{K+1} s + 1}$	$\frac{K_{L1}}{K+1}$	$\frac{K_{L2}}{k+1}$	$\sqrt{\frac{K+1}{T_1 T_2}}$	$\frac{T_1 + T_2}{2\sqrt{T_1 T_2} \sqrt{K+1}}$
PD	$\frac{K_{L1}}{K+1} \frac{1}{\frac{T_1 T_2}{K+1} s^2 + \frac{(T_1 + T_2 + K T_D)}{K+1} s + 1}$	$\frac{K_{L2}}{K+1} \frac{T_1 s + 1}{\frac{T_1 T_2}{K+1} s^2 + \frac{(T_1 + T_2 + K T_D)}{K+1} s + 1}$	$\frac{K_{L1}}{K+1}$	$\frac{K_{L2}}{k+1}$	$\sqrt{\frac{K+1}{T_1 T_2}}$	$\frac{T_1 + T_2 + K T_D}{2\sqrt{T_1 T_2} \sqrt{K+1}}$
I	$\frac{K_{L1} T_1}{K_{p1} K_{p2}} \frac{s}{\frac{T_1(T_1 + T_2)}{K_{p1} K_{p2}} s^2 + \frac{T_1}{K_{p1} K_{p2}} s + 1}$	$\frac{K_{L2} T_1}{K_{p1} K_{p2}} \frac{(T_1 + 1)s}{\frac{T_1 T_2}{K_{p1} K_{p2}} s^2 + \frac{T_1(T_1 + T_2)}{K_{p1} K_{p2}} s + \frac{T_1}{K_{p1} K_{p2}} s + 1}$	0	0	CONDICIONES DE ESTABILIDAD $T_1) K_{p1} K_{p2} \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$	
PI	$\frac{K_{L1} T_1}{K} \frac{s}{\frac{T_1 T_2}{K} s^2 + \frac{T_1(T_1 + T_2)}{K} s + \frac{T_1(1+K)}{K} s + 1}$	$\frac{K_{L2} T_1}{K} \frac{(T_1 + 1)s}{\frac{T_1 T_2}{K} s^2 + \frac{T_1(T_1 + T_2)}{K} s + \frac{T_1(1+K)}{K} s + 1}$	0	0	$T_1) \frac{K}{K+1} \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$	
PID	$\frac{K_{L1} T_1}{K} \frac{s}{\frac{T_1 T_2}{K} s^2 + \frac{T_1(T_1 + T_2 + K T_D)}{K} s^2 + \frac{T_1(1+K)}{K} s + 1}$	$\frac{K_{L2} T_1}{K} \frac{(T_1 + 1)s}{\frac{T_1 T_2}{K} s^2 + \frac{T_1(T_1 + T_2 + K T_D)}{K} s^2 + \frac{T_1(1+K)}{K} s + 1}$	0	0	$T_1) \frac{K}{K+1} \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2 + K T_D}$	

Tabla 5.2

Cuando se añade la acción integral el denominador se convierte en uno de tercer orden y aparece una s en el numerador. En lo que a estabilidad se refiere, los dos primeros tipos de control son estables para todos los valores positivos de K y de T_D . Aplicando el método de Routh a los últimos tres casos se obtienen las condiciones de estabilidad; por ejemplo:

Para el controlador PI^8 el denominador de la Función de Transferencia es

$$\frac{T_i T_1 T_2}{K} s^3 + \frac{T_i(T_1 + T_2)}{K} s^2 + \frac{T_i(1 + K)}{K} s + 1 \quad (5.11)$$

Cuyo arreglo de Routh es el siguiente:

$$\begin{array}{r} s^3 \\ s^2 \\ s \\ s^0 \end{array} \begin{array}{r} \frac{T_i T_1 T_2}{K} \\ \frac{T_i(T_1 + T_2)}{K} \\ \frac{(T_i^2(T_1 + T_2)(1 + K) - K T_i T_1 T_2)K}{K^2 T_i(T_1 + T_2)} \\ 1 \end{array} \begin{array}{r} \frac{T_i(1 + K)}{K} \\ 1 \\ \\ \end{array} \quad (5.12)$$

Como T_i y K son positivos:

$$T_i(T_1 + T_2)(1 + K) - K T_i T_1 T_2 > 0 \quad (5.13)$$

De donde:

$$T_i > \frac{K}{K + 1} \cdot \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} \quad (5.14)$$

Condición ésta necesaria para que el sistema sea estable.

Si se define $R = T_1 / T_2$, la expresión anterior queda como:

$$T_i > \frac{K}{K + 1} \cdot \frac{T_1}{1 + R} \quad (5.15)$$

La ecuación 5.15 muestra que el valor límite de T_i depende de la relación que guarda entre si las dos constantes de tiempo y sus magnitudes. Aplicando el teorema de Valor final se obtienen los errores estáticos dados en la tabla 5.2 a una entrada en escalón unitario; para

⁸ Se definirá en el capítulo seis

los controladores con acción I dicho error será cero siempre que se satisfaga la condición de estabilidad. Aunque los denominadores de la Función de Transferencia para L_1 y L_2 son iguales para cada tipo de controlador, el numerador de L_2 contiene el término $(T_1s + 1)$.

Este término origina un mayor sobrepaso en la respuesta a L_2 en comparación con la respuesta a L_1 , para los mismos parámetros del controlador. Como se apreciará en los ejemplos, una respuesta transitoria depende de los parámetros ω_n y ζ ; si se desea una respuesta rápida debe tener una ω_n suficientemente grande, lo cual se logra con un valor grande de K . Por otro lado, el carácter oscilatorio de la respuesta depende de ζ ; la respuesta será mas oscilatoria para valores pequeños de ζ ; pero como ζ disminuye para valores grandes de K , se produce una situación de compromiso: Si se usa un valor muy grande de K , el sistema responderá rápidamente, pero producirá muchas oscilaciones; en cambio, con un valor pequeño de K , las oscilaciones serán pocas o nulas, pero la respuesta será lenta.

Las ventajas de la adición de acción derivativa se aprecian en las formulas para ω_n y ζ dadas en la tabla 5.2. Para una ω_n dada, la acción derivativa produce un valor mayor de ζ que el que brinda el control proporcional solo, produciendo, por lo tanto menor oscilación en la respuesta. Por otro lado, para una ζ deseada, la adición de acción D permite un valor de K aún mayor, produciendo una mayor velocidad de respuesta y dejando un error final mucho menor.

5.3 Capacitancia simple y múltiple

Este tipo de proceso muestra el efecto llamado de autorregulación, pues si una de las variables que lo afectan cambia de valor, aunque sea ligeramente, el proceso no alcanza un nuevo valor, aunque sea ligeramente, el proceso no alcanza un nuevo valor de equilibrio y si, en cambio, se comportará inestablemente.

En la figura 5.4 se tiene un proceso sólo capacitivo.

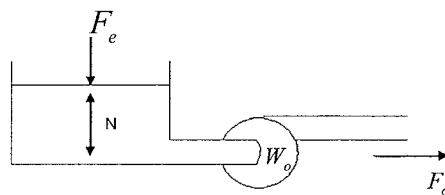


Fig. 5.4

El flujo de entrada e es independiente del nivel. El flujo de salida también es independiente del nivel del tanque y sólo depende de la velocidad de la bomba de desplazamiento constante, en tal forma que:

$$F_o(t) = KW_o(t) \quad (5.16)$$

Donde

$F_o(t)$ = Flujo de salida total

K = constante

$W_o(t)$ = Velocidad de la bomba

La ley fundamental aplicada a este tipo de procesos es la de la conservación de la masa, también llamada de continuidad, la cual establece que:

Acumulación = flujo de entrada – flujo de salida

Matemáticamente:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{dAN(t)}{dt} = F_e(t) - F_o(t) \quad (5.17)$$

Donde

$V(t)$ = Volumen del líquido en el tanque

Expresando las variables $F(t)$, $W_o(t)$, y $N(t)$ como la suma de su valor nominal más las variaciones alrededor de ese valor:

$$F_e(t) = \bar{F}_e + f_e(t) \quad (5.18)$$

$$W_o(t) = \bar{W}_o + w_o(t) \quad (5.19)$$

$$N(t) = \bar{N} + n(t) \quad (5.20)$$

Donde $F_e(t)$, $N(t)$ y $W_o(t)$ son valores totales de las variables; \bar{F}_e , \bar{N} y \bar{W}_o son los valores de estado permanentes o nominales; $f_e(t)$, $n(t)$ y $w_o(t)$ son las variaciones alrededor del valor nominal.

Si el área es constante y se sustituyen las ecuaciones 5.18, 5.19, 5.20 y 5.17 tenemos que:

$$A \frac{d}{dt} \{N + n(t)\} = \bar{F}_e + f_e(t) - K \{\bar{W}_o + w_o(t)\} \quad (5.21)$$

Puesto que para que el sistema esté en equilibrio se debe cumplir que:

$$\bar{F}_e = \bar{F}_o = k\bar{W}_o \quad (5.22)$$

Y ya que

$$\bar{N} = \text{Constante}$$

La ecuación 5.21 se convierte en:

$$A \frac{dn(t)}{dt} = F_e(t) - Kw_o(t) \quad (5.23)$$

Transformando la ecuación anterior:

$$AsN(s) = F_e(s) - Kw_o(s) \quad (5.24)$$

Cuya representación a cuadros se da en la figura 5.5

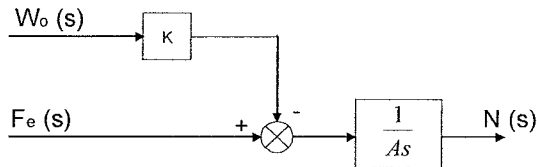


Fig. 5.5

De acuerdo con este diagrama, es evidente que el mínimo cambio permanente del flujo de entrada o de la velocidad de la bomba hará que el nivel cambie uniformemente hasta que el tanque se vacíe o se derrame.

Analogía eléctrica

Si se hace una analogía del proceso, considerando los flujos como corrientes y el nivel como un voltaje, la ecuación 5.23 tiene por analogía:

$$C \frac{dv(t)}{dt} = i_e(t) - i_o(t) \quad (5.25)$$

Donde

$$C \sim A$$

$$v(t) \sim n(t)$$

$$i_e(t) \sim f_e(t)$$

$$i_o(t) \sim Kw_o(t)$$

Y su circuito equivalente será:

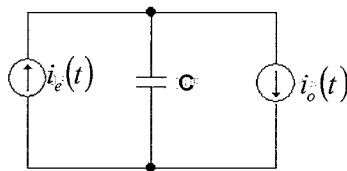


Fig. 5.6

Como se aprecia en la figura 5.5, el área de la sección transversal del tanque es equivalente a una capacitancia. La capacitancia eléctrica se define como:

$$C_e = \frac{\text{Carga almacenada}}{\text{Voltaje a través del elemento}}$$

Por lo tanto para el proceso:

$$C = \frac{\text{Volumen almacenado}}{\text{Nivel en el tanque}} = \frac{AN}{N} = A$$

Para tomar en cuenta las no linealidades posibles de un proceso, es conveniente definir el parámetro capacitancia en función de cambios de las variables con el fin de representarlo linealmente, de donde:

$$C = \frac{\text{Cambio de "carga" almacenada}}{\text{Cambio de "voltaje" en el elemento}}$$

Para un tanque de área no uniforme se tendrá:

$$C = \frac{dV}{dn} = A \quad (5.26)$$

Donde:

A = Área transversal del tanque, función de n.

Si se hubiera obtenido el circuito equivalente antes de obtener el diagrama a cuadros de la figura 5.4 teniendo en cuenta que la admitancia de un capacitor es C, en el dominio de Laplace, se hubiera obtenido fácilmente el diagrama a cuadros.

El concepto de analogía es muy importante, pues permite encontrar la función de transferencia de todo proceso que se desee representar en forma lineal

5.4 Tiempo muerto de un proceso

Uno de los principales parámetros en los procesos es el tiempo muerto, también conocido como retardo puro o como retardo de distancia – velocidad y se presenta en fenómenos que implican transporte de masa o de energía. Para ilustrar lo anterior obsérvese el proceso de la figura 5.7

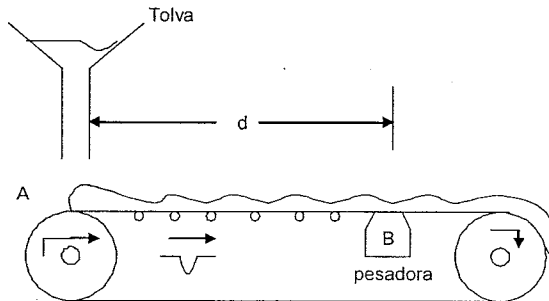


Fig. 5.7

Una tolva descarga material a razón de $W(t)$ kg. Por minuto en el extremo de una banda transportadora que se desliza sobre unos rodillos para proporcionar una distribución uniforme de material, así como para evitar los efectos de fricción y exceso de tensión sobre ésta debidos al peso del material transportado. A una distancia del punto de descarga una pesadora mide continuamente el peso del material.

Si llamamos

$W(t)$ = Peso descargado por unidad de tiempo Kg/min.

\bar{W} = Peso promedio descargado por unidad de tiempo, Kg/min.

$Y(t)$ = Peso medido por unidad de tiempo, Kg/min.

\bar{Y} = Peso medido promedio por unidad de tiempo, Kg/min

Se tiene que:

$$Y(t) = \bar{Y} + y(t) \quad (5.27)$$

$$W(t) = \bar{W} + w(t) \quad (5.28)$$

Donde $y(t)$ y $w(t)$ son variaciones de peso alrededor del valor promedio.

Es claro que los dos valores promedios deben ser iguales es decir:

$$\bar{Y} = \bar{W} \quad (5.29)$$

La ecuación 5.29 constituye el modelo estático del sistema. Físicamente indica que el valor descargado asume un valor promedio diferente del anterior, el valor promedio medido llegará a ser el mismo que el nuevo valor promedio de descarga.

De acuerdo con la figura, los cambios de valor de descarga se dejarán sentir en el punto de medición t_0 unidades de tiempo después. Dicho valor t_0 es el cociente entre la distancia recorrida y la velocidad de la banda:

$$t_0 = \frac{d}{v} \quad (5.30)$$

Y

$$y(t) = w(t - t_0) \quad (5.31)$$

O bien:

$$y(t + t_0) = w(t) \quad (5.32)$$

Si

$$Y(s) = \mathcal{L}\{y(t)\} \quad \text{y} \quad W(s) = \mathcal{L}\{w(t)\} \quad (5.33)$$

Transformando la ecuación 5.31

$$Y(s) = e^{-t_0 s} W(s) \quad (5.34)$$

O sea

$$\frac{Y(s)}{W(s)} = e^{-t_0 s} \quad (5.35)$$

En virtud de que la función de transferencia se define como la relación de la Transformada de Laplace de la variación de la entrada, una representación en diagrama a cuadros del proceso es la dada en la figura 5.8

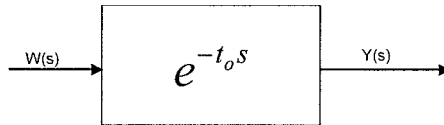


Fig. 5.8

5.6 METODOS EMPIRICOS DE IDENTIFICACIÓN

Cuando se desconoce la función de transferencia de un determinado proceso, por medio de este método es posible determinar en forma empírica los parámetros óptimos del controlador a usar.

El método se basa esencialmente en el análisis del proceso en lazo abierto, el cual describe las propiedades dinámicas de este proceso a partir de las cuales se puede determinar el valor de los parámetros del controlador.

La curva de reacción se obtiene graficando la respuesta del sistema a una función escalón, tal como se muestra en la figura 5.9

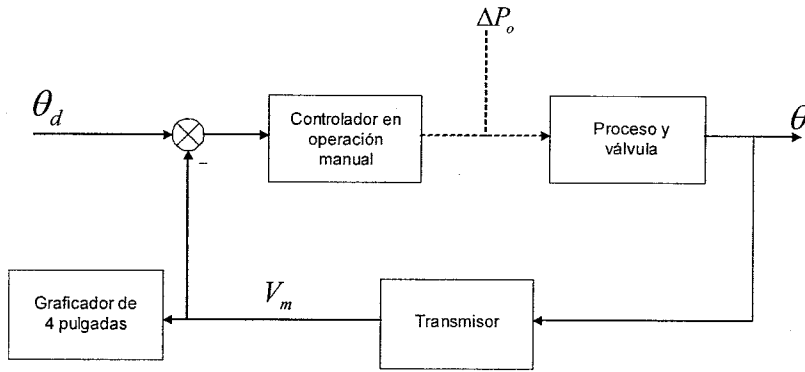


Fig. 5.9

Como se puede observar, esta función escalón puede ser aplicada externamente desconectando el controlador de la línea o bien por medio de la operación manual del controlador. Normalmente, en un proceso manipulado por una válvula, el escalón consiste en un incremento en la presión aplicada al actuador de dicha válvula, ΔP_o .

Casi todos los procesos presentan una curva de reacción con característica sobreamortiguada, tal como se ilustra en la figura 5.10

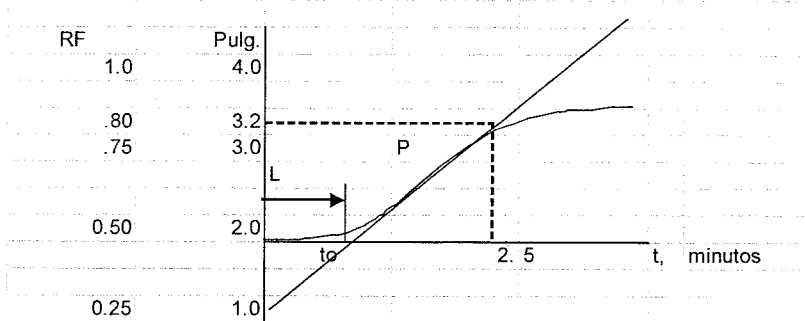


Fig. 5.10

Como podemos observar en esta figura 5.10, la curva de reacción trata de graficar la respuesta fraccional (RF) contra el tiempo donde la respuesta fraccional se define como la fracción de valor del rango del transmisor que ha alcanzado la variable de medición V_m

a) Para control P

$$K_c = \frac{\Delta P_o / 12}{SL} \cdot \frac{PSI}{PSI} \quad (5.36)$$

b) Para control PI:

$$K_c = 0.9 \frac{\Delta P_o / 12}{SL} \cdot \frac{PSI}{PSI} \quad (5.37)$$

c) Para control PID

$$K_c = 1.2 \frac{\Delta P_o / 12}{SL} \frac{PST}{PST} \quad (5.38)$$

$$T_i = \frac{L}{0.5} \quad \text{Minutos por repetición}$$

$$T_D = 0.51 \quad \text{Minutos}$$

Comparando estas tres series de valores recomendados por Ziegler-Nichols, vemos que son consistentes con la idea de que la acción integral tiende a hacer el sistema más inestable ya que para la acción PI el valor de K_c recomendado es sólo el 90 % del recomendado para la acción P. Por otro lado, si se añade acción derivativa se comprueba el efecto estabilizador de esta, ya que permite aumentar el valor de la ganancia proporcional en un 33% y disminuir el valor del tiempo integral en un 66% en relación con los valores recomendados para la acción PI.

CAPITULO 6

ACCIONES DE CONTROL

Objetivo: Habilitar al alumno en la selección y aplicación de las acciones de control de acuerdo con las características del lazo y respuesta deseada.

Un control automático compara el valor efectivo de salida de una planta con el valor deseado, determina la desviación y produce una señal de control que reduce la desviación a cero o aun valor pequeño. La forma en que el control automático produce la señal de control recibe el nombre de acción de control.

En este capítulo se presentan las acciones de control básicas utilizadas comúnmente en los controles automáticos industriales.

De acuerdo con su acción de control se pueden clasificar los controles automáticos industriales en: Control de dos posiciones, control proporcional, control integral, control derivativo, control proporcional-integral, control proporcional-derivativo, control proporcional integral-derivativo.

La mayoría de los controles automáticos industriales usan como fuentes de potencia la electricidad o un fluido a presión que puede ser aceite o aire. También se pueden clasificar los controles automáticos según el tipo de fuente de energía usada en su funcionamiento, en controles neumáticos hidráulicos o electrónicos. Qué tipo de control usar depende de la naturaleza de la planta y sus condiciones de funcionamiento inclusive consideraciones de seguridad, costo, disponibilidad, confiabilidad, precisión, peso y tamaño.

En los controles automáticos industriales son muy comunes los tipos siguientes de acción básica de control: acción P, acción PI, acción PD, acción PID. Es importante comprender las características básicas de las diversas acciones, para que se pueda elegir la más adecuada para determinada aplicación.

Control de dos posiciones

La acción de control de dos posiciones se conoce como todo-nada, abierto-cerrado, es básicamente un tipo de control discreto que sólo mantiene a la variable dentro de una banda de valores que está limitada por un límite máximo y otro mínimo, quedando el valor deseado entre los dos límites. Como en todos los casos, el control todo-nada responde a las perturbaciones que ocurren a la variable de proceso. En el control de dos posiciones la salida del controlador a la válvula de control que recibe una señal de 0%, o bien del 100% cuando el valor de la variable medida pro el sensor esté arriba o abajo del punto de ajuste; es decir, que cuando el sensor detecta que la temperatura está abajo del punto de ajuste, envía una señal para abrir la válvula de control y deja pasar el vapor hasta que la temperatura del producto llegue a cruzar el valor del punto de ajuste, entonces e controlador detecta que ya rebaso este valor entonces envía una señal del 0% para cerrar la válvula de control y cancelar el flujo de vapor de calentamiento.

Esta acción de control es aplicable a aquellos procesos que no requieren tener mucha exactitud en el control, y que tienen tiempos muertos grandes y grandes capacitancias.

Además, el control de dos posiciones produce oscilaciones en el proceso. Si el proceso puede tolerar esto, entonces el control de dos posiciones es adecuado, sino, debemos buscar otro método aplicable.

6.1 Control proporcional

El control proporcional se conoce como control continuo, que proporciona una respuesta instantánea del controlador a los cambios que existan en el error. La fórmula para el control proporcional es:

$$K_c e(t) \quad (6.1)$$

Donde K_c es la ganancia del controlador y $e(t)$ es el error. El significado de la ganancia es que da un cambio fraccional de la salida con respecto al cambio de entrada que lo causo, y en forma práctica significa que si la ganancia tienen una magnitud, así corresponderá la magnitud de la salida del controlador que se origina por un error dado.

Cuando hay una perturbación en el proceso o un cambio de punto de ajuste, el controlador tratará de llevar a la variable controlada el valor deseado; y dependiendo de la ganancia, la respuesta será más rápida y de mayor sensibilidad.

La banda proporcional se define como el inverso de la ganancia ($P.B. = 100/K_c$) que es el cambio en la señal del transmisor (expresado como un porcentaje de su rango), que se requiere para producir un 100% de cambio en la salida del controlador.

Cuando el controlador proporcional actúa sólo en el lazo de control su señal de salida está dada por la siguiente expresión:

$$m = m_0 + k_c e(t) \quad (6.2)$$

Donde m es la señal de salida del controlador y m_0 es uno de valor base. Este valor de base se ajusta normalmente al 50% del rango de salida del controlador, para darle posibilidad al controlador de moverse en ambas direcciones.

Cuando la ganancia es unitaria, es decir, $K_c = 1$, la banda Proporcional será $B.P. = 100\%$; y si la ganancia aumenta, la banda Proporcional disminuye (banda angosta) m esto le da una mayor rapidez de respuesta al controlador; por el contrario, si la ganancia es menor que la unidad, la banda proporcional será mayor del 100% (Banda ancha), esto le da una menor rapidez de respuesta al controlador y hace que el proceso se haga lento y tenga mayor estabilidad.

En el caso de que la banda Proporcional sea angosta, es decir que la ganancia sea mayor que la unidad, el controlador responderá más rápidamente, y a medida que se aumente la ganancia se llegará a un límite de estabilidad en el que ya no es conveniente subir más la ganancia porque el lazo se volverá inestable y no habrá más control, ya que se tendrán oscilaciones que llevarán al control todo –nada en forma oscilatoria. Este proceso de aumento de la ganancia con el fin de eliminar el “OFFSET” o error en estado estacionario, necesitará, más bien, el uso de otra acción de control que es la acción integral

6.2 Control integral

El propósito de la acción integral de control es eliminar el error en estado estacionario u “OFFSET”. Lo hace por medio de la integración o acumulación del error en el tiempo. La fórmula para la acción integral es:

$$m(t) = \frac{K_c}{T_i} \int e(t) dt \quad (6.3)$$

Donde:

t = tiempo

T_i = el tiempo integral o de reajuste

$\int e(t) dt$ = La integral o suma abreviada del error en el tiempo

El tiempo de integración T_i es el parámetro de sintonización de la acción de control integral. Este T_i es el tiempo que le lleva a la acción integral de control para igualar al cambio instantáneo producido por la acción proporcional en un error que se originó por un cambio de escalón.

Algunos fabricantes de equipos de control calibran el tiempo integral como una razón de reajuste que es el recíproco del tiempo T_i .

Aunque la acción integral es eficiente para eliminar el error en régimen permanente, es más lenta que la acción proporcional, porque debe actuar durante un periodo de tiempo y produce un retraso de fase en el lazo de control.

La acción integral actúa en función de la velocidad de cambio de la variable controlada de tal manera que si la variable controlada cambia su valor, con respecto al valor deseado, funciona la integral porque existe un error. Cuando existe un cambio en el valor deseado o “set point”, la salida del controlador tiene una respuesta inmediata al control proporcional y posteriormente la rampa es la respuesta del control integral.

6.3 Control derivativo

La acción derivativa se agrega en algunos casos al control proporcional para mejorar, la velocidad de respuesta de los sistemas lentos. La acción derivativa se anticipa al efecto de grandes cambios de carga incrementando la salida cuando el error está cambiando rápidamente.

La acción derivativa por tanto, responde en función de la velocidad de cambio del error.

La ecuación representativa en el dominio del tiempo de la acción derivativa es:

$$T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (6.4)$$

y combinada con la acción proporcional, será:

$$m(t) = k_c \left(e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (6.5)$$

Donde:

T_D = tiempo derivativo

El control derivativo introduce un adelanto de fase en el lazo de control.

6.4 Control Proporcional Integral

La acción de este controlador consta de dos partes; las cuales son:

Acción total = acción proporcional + acción integral cuya señal de salida viene dada por:

$$u(t) = \pm K_c \left[e(t) + \int_0^t \frac{1}{T_i} e(t) dt \right] \quad (6.6)$$

Donde:

$u(t)$ = variación de la salida de control

K_c = ganancia proporcional

T_i = constante de tiempo de acción integral, min. ó seg.

$e(t)$ = error del sistema

Si a un controlador fuera de proceso con acción PI, se le aplica una señal constante de error, $e(t)$, la salida será:

$$u(t) = \pm K_c \left(e + \frac{et}{T_i} \right) \quad (6.7)$$

Nótese que la salida asume inmediatamente un valor igual a $K_C e$, que corresponde a la acción proporcional; a dicho valor se le empieza a aumentar el término correspondiente a la

Acción integral, $\frac{K_c et}{T_i}$

Cuando ha transcurrido un tiempo igual a T_i , el término de la acción integral es igual al de la acción proporcional. Se dice entonces, que la acción integral ha repetido la acción proporcional. Por esta razón a T_i se le llama minutos por repetición o segundos por repetición y la escala de T_i viene calibrada con dicha leyenda. Algunos fabricantes calibran la escala de acción integral con el valor recíproco de T_i , llamándole repeticiones por minuto.

Una desventaja del control PI es su tendencia a saturarse si se usa en procesos discontinuos (Reset windup).

Cuando el proceso es detenido, generalmente cerrado una válvula manual, la variable medida cambia grandemente de valor haciendo que el controlador detecte un gran error el cual es integrado llevando al controlador a saturación, abriendo completamente la válvula de control en un esfuerzo inútil pro corregir el error. Cuando el proceso de arranca de nuevo, existirá un gran sobrepaso pues el controlador seguirá saturado hasta que el valor de la variable alcance el punto de valor deseado.

6.5 Control de acción proporcional derivativo

Este controlador combina las acciones proporcional y derivativa, según la siguiente ecuación:

$$u(t) = \pm K_c \left\{ e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (6.8)$$

Donde:

$u(t)$ = variación de la salida de control

K_c = ganancia proporcional

T_D = tiempo derivativo (minutos o segundos)

$e(t)$ = señal de error del sistema

Si a un controlador PD se le aplica, fuera de línea, una señal de error en forma de rampa de pendiente A, su salida vendrá dada por:

$$u(t) = \pm K_c (At + T_D A) \quad (6.9)$$

6.6 Control proporcional integral derivativo

Un control que combina las tres acciones: proporcional, integral y derivativa, tiene una salida dada por:

$$u(t) = \pm K_c \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (6.10)$$

Donde

K_c = Ganancia proporcional efectiva del controlador

T_i = Constante de tiempo integral efectivo

T_D = Tiempo derivativo efectivo

$e(t)$ = Error del sistema

Cuando el control se usa para producir las tres acciones, los parámetros efectivos presentados son diferentes de los indicados por las perillas de selección, pues existe un factor de interacción que depende de los valores de los tiempos seleccionados.

6.7 Acción de control proporcional

Para un control de acción proporcional, la relación entre la salida del controlador $m(t)$ y la señal de error actuante $e(t)$ es

$$m(t) = K_p e(t) \quad (6.11)$$

O, en magnitudes transformadas de Laplace,

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \quad (6.12)$$

Donde K_p se denomina sensibilidad proporcional o ganancia.

Cualquiera que sea el mecanismo en sí, y sea cual fuere la potencia que lo alimenta, el control proporcional esencialmente es un amplificador con ganancia ajustable. En la figura 6.1 puede verse un diagrama de bloques de este control.

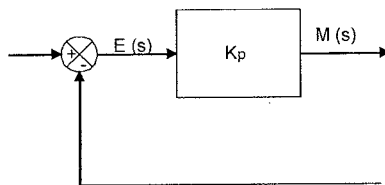


Fig. 6.1

6.8 Acción de control proporcional e integral

La acción de control proporcional e integral queda definida por la siguiente ecuación:

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (6.13)$$

O la función de transferencia del control es

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (6.14)$$

Donde K_p es la sensibilidad proporcional o ganancia y T_d es el tiempo integral. Tanto K_p como T_i son regulables. El tiempo integral regula la acción de control integral, mientras una modificación en K_p afecta tanto a la parte integral como a la proporcional de la acción de control. A la inversa del tiempo integral T_i se la llama frecuencia de reposición. La frecuencia de reposición es el número e veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. La frecuencia de repetición se mide en términos de repeticiones por minuto. La figura 6.2 presenta un diagrama de bloques de un control proporcional e integral. Si la señal de error actuante $e(t)$ es una función escalón unitario como se ve en la figura 6.2 la salida del control $m(t)$ pasa a ser la indicada.

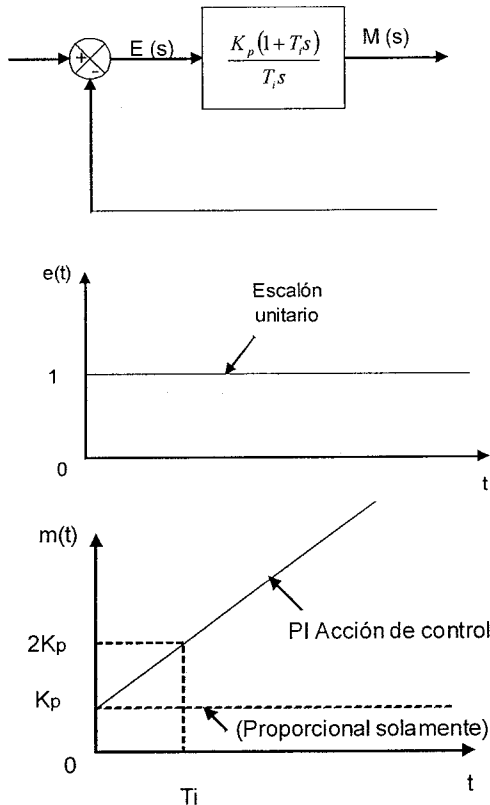


Fig. 6.2

Si la señal de error actuante $e(t)$ es una función rampa unitaria, como se ve en la figura 6.2 la salida del control $m(t)$ es la que puede verse en la figura la acción de control derivativo tiene carácter de anticipación. Sin embargo, por supuesto, la acción derivativa nunca puede anticiparse a una acción que aún no ha tenido lugar.

Mientras la acción de control derivativo tiene la ventaja de ser anticipadora, tiene las ventajas de que amplifica las señales de ruido y puede producir efecto de saturación en el accionador.

Hay que notar que nunca se puede tener una acción de control derivativo sola, porque ese control es efectivo únicamente durante periodos transitorios.

6.9 Acción de control proporcional y derivativo

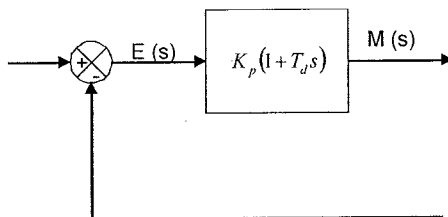
La acción de control proporcional y derivativo queda definida por la siguiente ecuación:

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6.15)$$

y la función de transferencia es

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (6.16)$$

Donde K_p es la sensibilidad proporcional y T_d es el tiempo derivativo. Tanto K_p como T_d son regulables. La acción de control derivativa, a veces denominada control de velocidad, es cuando el valor de salida del control es proporcional a la velocidad de variación de la señal de error actuante. El tiempo derivativo T_d es el intervalo de tiempo en el que la acción de velocidad se adelanta al efecto de acción proporcional. La figura 6.3 presenta un diagrama de bloques de un control proporcional y derivativo. Si la señal de error actuante $e(t)$ es una función rampa unitaria, como se ve en la figura 1 salida del control $m(t)$ es la que puede verse en la figura 6.3 y también puede observarse que la acción de control derivativo tiene carácter de anticipación. Sin embargo, por supuesto, la acción derivativa nunca puede anticiparse a una acción que aun no ha tenido lugar.



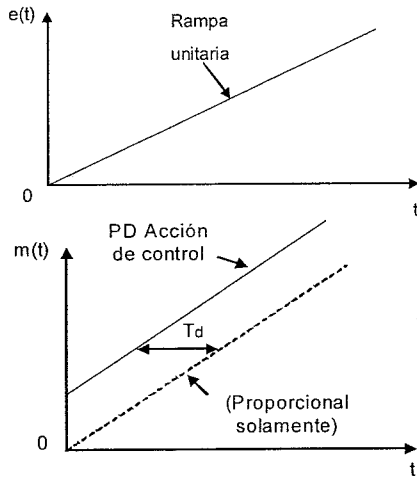


Fig. 6.3

Mientras la acción de control derivativo tiene ventaja de ser anticipadora, tiene las desventajas de que amplifica las señales de ruido y puede efecto de saturación en el accionador.

Hay que notar que nunca puede tener una acción de control derivativo sola, porque este control es efectivo únicamente durante periodos transitorios.

6.10 Acción de control proporcional y derivativo e integral

La combinación de los efectos de acción proporcional, acción de control derivativa y acción de control integral, se llama acción de control proporcional y derivativo e integral. Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un control con estas acciones de control combinadas está dada por

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (6.17)$$

O la función transferencia es

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (6.18)$$

Donde K_p representa la sensibilidad proporcional, T_d el tiempo derivativo y T_i el tiempo integral. En la figura se puede ver el diagrama de bloques de control proporcional y

derivativo e integral. Si $e(t)$ es una función rampa unitaria como la de la figura la salida del control $m(t)$ es el que puede verse en la fig. 6.4

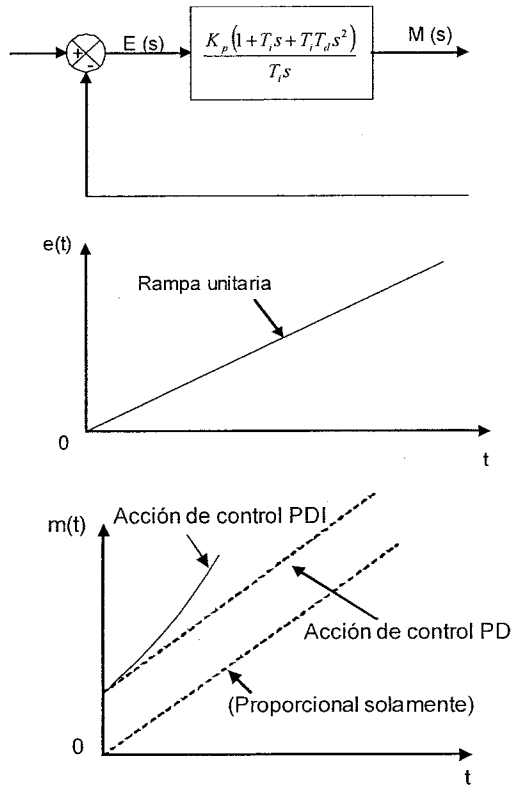


Fig.6.4

6.11 Aplicaciones

Las tres acciones combinadas PID actúan sobre el elemento final de control en la forma señalada en la figura 6.5

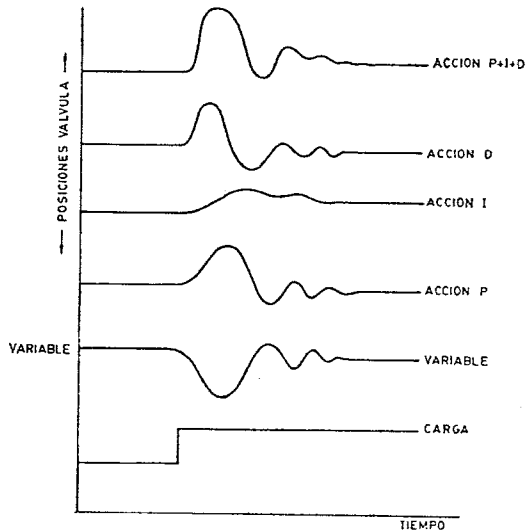


Figura 6.5

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 consigna.
2. La acción integral mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de consigna.
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 coste 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. Sin embargo, económicamente hay muy poca diferencia entre un controlador PI y uno PID, de modo que en el caso de estudiar procesos sus perturbaciones que no sean bien conocidas puede ser más barato adquirir el controlador PID para tener así una 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.

En la tabla se indica una guía general para que seleccionar un sistema de control, si bien hay que señalar que sólo sirve de orientación general debe consultarse únicamente como guía de aproximación al control idóneo.

Control	Proceso		Cambios de carga	Aplicaciones
	Capacitancia	Resistencia		
Todo - nada	Grande	Cualquiera	Cualquiera	Control de nivel y temperatura en procesos de gran capacidad
Flotante	Media	^^	^^	Procesos con pequeños tiempos de retardo
Proporcional	Pequeña a media	Pequeña	Moderados	Presión, temperatura y nivel donde el offset no es inconveniente
Proporcional + integral	Cualquiera	^^	Cualquiera	La mayor parte de aplicaciones, incluyendo el cauda
Proporcional + derivada	Media	^^	^^	Cuando es necesaria una gran estabilidad con un offset mínimo y sin necesidad de acción integral
Proporcional + integral + derivada	Cualquiera	Grande	Rápido	Procesos con cambios rápidos y retardos apreciables (control de temperatura en intercambiador de calor)

Tabla 6.1

6.12 Error del sistema

Se considera al controlador como las señales de entrada y salida. Los controladores comerciales más usuales son del tipo neumático o bien de tipo electrónico. En los primeros se usa aire a presión como suministro y las señales de entrada y salida son de naturaleza eléctrica.

Orgánicamente el controlador se subdivide en dos grandes partes: un mecanismo o dispositivo de comparación que resta, de la señal de valor deseado, la señal recibida desde el transmisor, V_m , la cual es una indicación del valor de la variable de salida del proceso, θ_o ; la diferencia constituye la señal de error del sistema, la cual es proporcional a la verdadera diferencia. En general:

$$e(t) \propto (\theta_d - \theta_o) \quad (6.19)$$

Donde:

\propto = signo de proporcionalidad

θ_o = variable de salida del proceso

θ_d = valor deseado de la variable de salida

Definición:

$$e(t) = (V_d - V_m) \quad (6.20)$$

Donde

$e(t)$ = señal de error

V_m = señal de transmisor

V_d = Valor deseado de la señal del transmisor

El valor deseado de la señal del transmisor, V_d (set-point), puede fijarse a voluntad en el controlador por medio de la perilla.

La igualdad en cuestión es de gran importancia en el análisis del control de procesos.

La segunda parte la constituye la unidad de control en sí; la cual recibe la señal de error producida para, finalmente, dar como salida una señal de control, la cual es aplicada al elemento de acción final, el actuador, el que producirá una señal de actuación que a su vez alterará el valor de la variable manipulada del proceso.

6.12 Error integral cuadrático

La estabilidad del control es la característica del sistema que hace que la variable vuelva al punto de consigna después de una perturbación.

Los criterios deseables para la estabilidad son los siguientes:

En el criterio de mínima integral del cuadrado del error (ISE), donde debe ser mínima la expresión $\int_0^t [e(t)]^2 \cdot dt$ que penaliza los grandes errores [$e(t)$ está elevado al cuadrado] con lo cual las respuestas son poco amortiguadas.

6.13 Error integral absoluto

Criterio de razón de amortiguamiento. La amortiguación de la respuesta es tal que la relación de amplitudes entre las cestas de los dos primeros ciclos sucesivos es 0,25 es decir, que cada onda equivale a una cuarta parte de la anterior. Este criterio es un compromiso entre la estabilidad de la respuesta del controlador y la rapidez del retorno de la variable a un valor estable: una relación mayor que $\frac{1}{4}$ dará mayor estabilidad pero prolongará el tiempo de normalización de la variable, mientras que una relación menor que $\frac{1}{4}$ devolverá la variable más rápidamente al punto de consigna o a un valor estable, pero perjudicará la estabilidad del sistema, Este criterio es el mas importante y se aplica especialmente en los procesos donde la duración de la desviación es tan importante como el valor de la misma.

Criterio de área mínima. Este criterio indica que el área de la curva de recuperación debe ser mínima, para lograr que la desviación sea mínima en el tiempo mas corto. Es decir, la

expresión $\int_0^t |e| dt$ en la que $|e|$ es el valor absoluto de la desviación, debe tener el valor mínimo. Se denomina también criterio de la integral mínima del valor absoluto del error (IAE).

El criterio de mínima integral en el tiempo del valor absoluto del error (ITAE), donde debe ser mínima la expresión $\int_0^t [e(t)]^2 \cdot dt$ y que penaliza los pequeños errores que se presentan al final de la curva de recuperación, con lo cual, las respuestas son totalmente amortiguadas.

CAPITULO 7

SELECCIÓN DE ELEMENTOS FINALES DE CONTROL

7.1 Generalidades

En el control automático de los procesos industriales la válvula de control juega un papel muy importante en el bucle de regulación. Realiza la función de variar el caudal del fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida comportándose como un orificio de área continuamente variable. Dentro del bucle de control tiene tanta importancia como el elemento primario, el transistor y el controlador Fig. 7.1

Una válvula de control típica se compone básicamente del cuerpo y del servomotor.

El cuerpo de la válvula contiene en su interior el obturador y los asientos y está provisto de rosca o de bridas para conectar la válvula a la tubería. El obturador es quien realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Está unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y es accionado por el servomotor.

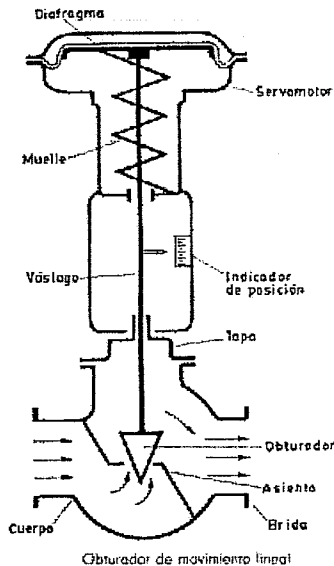


Fig. 7.1

7.2 TIPOS DE VALVULAS

Las válvulas pueden ser de varios tipos según sea el diseño del cuerpo y el movimiento del obturador se mueve en la dirección de su propio eje se clasifican como se especifica a continuación.

- Válvula de globo
- Válvula en ángulo
- Válvula de jaula
- Válvula de compuerta
- Válvula en Y
- Válvula de cuerpo partido
- Válvula Saunders
- Válvula de compresión
- Válvula de obturador excéntrico rotativo
- Válvula de obturador cilíndrico excéntrico
- Válvula de mariposa
- Válvula de bola
- Válvula de orificio ajustable
- Válvula de flujo axial

Válvula de globo

Puede verse en las figuras 7.2 a, b y c siendo de simple asiento, de doble asiento y de obturador equilibrado respectivamente. Las válvulas de simple asiento precisan de un actuador de mayor tamaño para que el obturador cierre en contra de la presión diferencial del proceso. Por lo tanto, se emplean cuando la presión del fluido es baja y se precisa que las fugas en posición de cierre sean mínimas. El cierre estanco se logra con obturadores provistos de una arandela de teflón. En la válvula de doble asiento o de obturador equilibrado la fuerza de desequilibrio desarrollada por la presión diferencial a través del obturador es menor que en la válvula de simple asiento. Por este motivo se emplea en válvulas de simple asiento. Por este motivo se emplea en válvulas de gran tamaño o bien cuando deba trabajarse con una alta presión diferencial. En posición de cierre las fugas son mayores que en una válvula de simple asiento.

Válvula de ángulo

Esta válvula presentada en la figura 7.2 d permite obtener un fluido de caudal regular son excesivas turbulencias y es adecuada para disminuir la erosión cuando ésta es considerable por las características del fluido o por la excesiva presión diferencial. El diseño de la válvula es idóneo para el control de fluidos que vaporizan para trabajar con grandes presiones diferenciales y ara los fluidos que contienen sólidos en suspensión.

Válvula de tres vías

Este tipo de válvula se emplea generalmente para mezclar fluidos –válvulas mezcladoras Fig. 7.2 e- o bien para derivar de un fluido de entrada dos de salida- válvulas diversotas Fig. 7.2 f Las válvulas de tres vías intervienen típicamente en el control de temperatura de intercambiadores de calor.

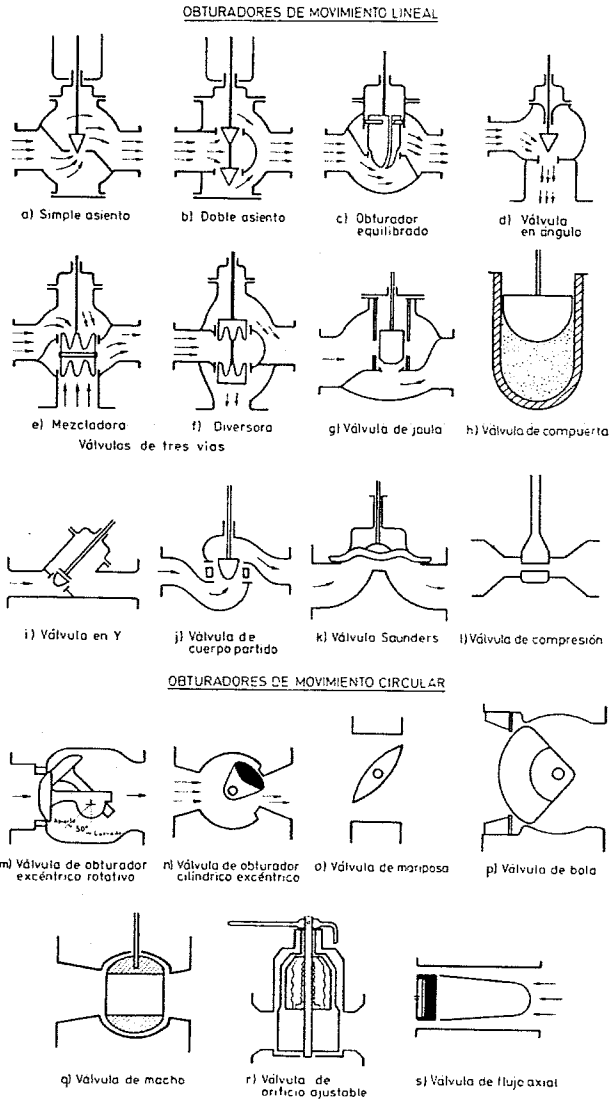


Fig. 7.2

Válvula de jaula

Consiste en un obturador cilíndrico que desliza en una jaula con orificios adecuados a las características de caudal deseadas en la válvula Fig. 7.2 g Se caracterizan por el fácil desmontaje del obturador y porque éste puede incorporar orificios que permiten eliminar prácticamente el desequilibrio de fuerzas producido por la presión diferencial favoreciendo la estabilidad del funcionamiento. Por este motivo, este tipo de obturador equilibrado se emplea en válvulas de gran tamaño o bien cuando deba trabajarse con una alta presión diferencial. Como el obturador está contenido dentro de la jaula, la válvula es muy resistente a las vibraciones y al desgaste. Por otro lado, el obturador puede disponer de aros de teflón que, con la válvula en posición cerrada, asientan contra la jaula y permiten lograr así un cierre hermético.

Válvula de compuerta

Esta válvula efectúa su cierre con un disco vertical plano, o de forma especial, y que se mueve verticalmente al flujo del fluido. Por su disposición es adecuada generalmente para control todo- nada, ya que en posiciones intermedias tiende a bloquearse. Tiene la ventaja de presentar muy poca resistencia al flujo de fluido cuando está en posición de apertura total Fig. 7.2h

Válvula en Y

En la figura 7.2i puede verse su forma. Es adecuada como una válvula de cierre y de control. Como válvula todo-nada se caracteriza por su baja pérdida de carga y como válvula de control presenta una gran capacidad de caudal. Posee una característica de autodrenaje cuando está instalada inclinada con incierto ángulo. Se emplea usualmente en instalaciones criogénicas.

Válvula de cuerpo partido

Esta válvula Fig. 7.2j es una modificación de la válvula de globo de simple asiento teniendo el cuerpo partido en dos partes entre las cuales está presionado el asiento.

Esta disposición permite una fácil sustitución del asiento y facilita un flujo suave del fluido sin espacios muertos en el cuerpo. Se emplea principalmente para fluidos viscosos y en la industria alimentaria.

Válvula Saunders

En la válvula Saunders 7.2k el obturador es una membrana flexible que a través de un vástago unido a un servomotor, es forzada contra un resalte del cuerpo cerrado así el paso del fluido.

La válvula se caracteriza por el cuerpo puede revestirse fácilmente de goma o de plástico para trabajar con fluidos agresivos.

Tiene la desventaja de que el servomotor de accionamiento debe ser muy potente. Se utiliza principalmente en procesos químicos difíciles, en particular en el manejo de fluidos negros o agresivos o bien en el control de fluidos conteniendo sólidos en suspensión.

Válvula de compresión

Esta válvula funciona mediante el pinzamiento de dos o más elementos flexibles, por ejemplo, un tubo de goma. Igual que las válvulas de diafragma se caracterizan porque proporcionan un óptimo control en posición de cierre parcial y se aplican fundamentalmente en el manejo de fluidos negros corrosivos, viscosos o conteniendo partículas sólidas en suspensión Figura 7.2l

Las válvulas en las que el obturador tiene un movimiento circular se clasifican como se detalla a continuación.

Válvula de obturador excéntrico rotativo

Consiste en un obturador de superficie esférica que tiene un movimiento rotativo excéntrico y que está unido al eje de giro por uno o dos brazos flexibles Fig. 7.2 m

El eje de giro sale al exterior del cuerpo y es accionado por el vástago de un servomotor. El par de éste es reducido gracias al movimiento excéntrico de la cara esférica del obturador.

La válvula puede tener un cierre estanco mediante aros de teflón dispuestos en el asiento y se caracteriza por su gran capacidad de caudal, comparable a las válvulas mariposa y a las de bola y por su elevada pérdida de carga admisible.

Válvula de obturador cilíndrico excéntrico

Esta válvula Fig. 7.2 n tiene un obturador cilíndrico excéntrico que asienta contra un cuerpo cilíndrico. El cierre hermético se consigue con un revestimiento de goma de teflón en la cara del cuerpo donde asienta el obturador. La válvula es de bajo coste y tiene una capacidad relativamente alta. Es adecuada para fluidos corrosivos y líquidos viscosos o conteniendo sólidos en suspensión.

Válvula de mariposa

El cuerpo está formado por un anillo cilíndrico dentro del cual gira transversalmente un disco circular Fig.7.2 o. La válvula puede cerrar herméticamente mediante un anillo de goma encastrado en el cuerpo. Un servomotor exterior acciona el eje de giro del disco y ejerce su par máximo cuando la válvula está totalmente abierta (en control todo-nada se consideran 90° y en control continuo 60°, a partir de la posición de cierre ya que la última parte del giro es bastante inestable), siempre que la presión diferencial permanezca constante. En la selección de la válvula es importante considerar las presiones diferenciales correspondientes a las posiciones de completa apertura y de cierre; se necesita una fuerza grande del actuador para accionar la válvula en caso de una caída de presión elevada.

Las válvulas de mariposa se emplean para el control de grandes caudales de fluidos a baja presión.

Válvula de bola

El cuerpo de la válvula tiene una cavidad interna esférica que alberga un obturador en forma esférica o de bola (de ahí su nombre) Fig. 7.2 p. La bola tiene un corte adecuado (usualmente en V) que fija la curva característica de la válvula, y gira transversalmente

accionada por un servomotor exterior. El cierre estanco se logra con un aro de teflón incorporado al cuerpo contra el cual asienta la bola cuando la válvula está cerrada. En posición de apertura total, la válvula equivale aproximadamente en tamaño a 75% del tamaño de la tubería. La válvula de bola se emplea principalmente en el control de caudal de fluidos negros, o bien en fluidos con gran porcentaje de sólidos en suspensión.

Una válvula de bola típica es la válvula de macho Fig. 7.2 q que consiste en un macho de forma cilíndrica o troncocónica con un orificio transversal igual al diámetro interior de la tubería. El macho ajusta en el cuerpo de la válvula y tiene un movimiento de giro de 90°. Se utiliza generalmente en el control manual todo –nada de líquidos o gases y en regulación de caudal.

Válvula de orificio ajustable.

El obturador de esta válvula consiste en una camisa de forma cilíndrica que está perforada con dos orificios, uno de entrada y otro de salida y que gira mediante una palanca exterior accionada manualmente o por medio de un servomotor. El giro del obturador tapa parcial o totalmente las entradas y salidas de la válvula controlando así el caudal. La válvula incorpora además una tarjeta cilíndrica que puede deslizarse dentro de la camisa gracias a un macho roscado de accionamiento exterior. La tajadera puede así fijarse manualmente en una posición determinada para limitar el caudal máximo Fig. 7.2r

La válvula es adecuada en los casos en que es necesario ajustar manualmente el caudal máximo del fluido, cuando el caudal puede variar entre límites amplios de forma intermitente o continua y cuando no se requiere un cierre estanco. Se utiliza para combustibles gaseosos o líquidos, vapor, aire comprimido y líquidos en general.

Válvula de flujo axial

Las válvulas de flujo axial consisten en un diafragma accionado neumáticamente que mueve un pistón, el cual a su vez comprime un fluido hidráulico contra un obturador formado por un material elastómero. De este modo, el obturador se expande para cerrar el flujo axial del fluido. Este tipo de válvulas se emplea para gases y es especialmente silencioso. Otra variedad de la válvula de flujo axial es la válvula de manguito, que es accionada por compresión exterior del manguito a través de un fluido auxiliar a una presión superior a la del propio fluido. Se utiliza también para gases Fig. 7.2s

7.3 Cuerpo de la válvula

El cuerpo de la válvula debe resistir la temperatura y la presión del fluido sin pérdidas, tener un tamaño adecuado para el caudal que debe controlar y ser resistente a la erosión o a la corrosión producida por el fluido.

El cuerpo y las conexiones a la tubería (bridadas o roscadas) están normalizados de acuerdo con las presiones y temperaturas de trabajo en las normas DIN y ANSI, entre otras, según puede verse en la figura 7.3 y 7.4

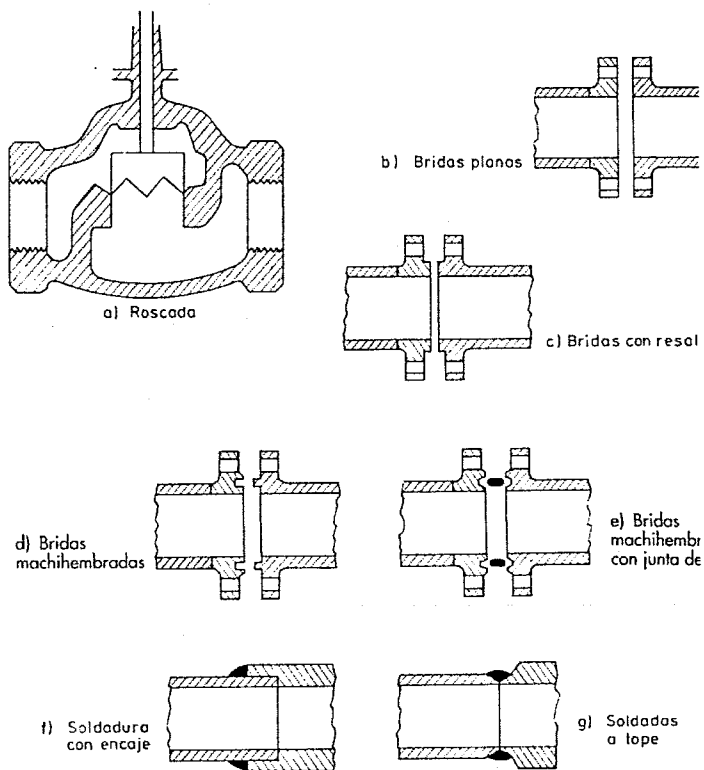


Fig. 7.3

CUERPOS DE BRONCE O HIERRO FUNDIDO

Material	Nominal lb	bar a °C	bar a °C	Norma ANSI
Bronce	150	10,3 - 208	15,5 - 65	B1624-1971
	300	20,7 - 216	34,5 - 65	Material ASTM B62
Hierro fundido	125	8,5 - 178	27 - 65	B16.1-1975
	250	17-207		Material ASTM A126

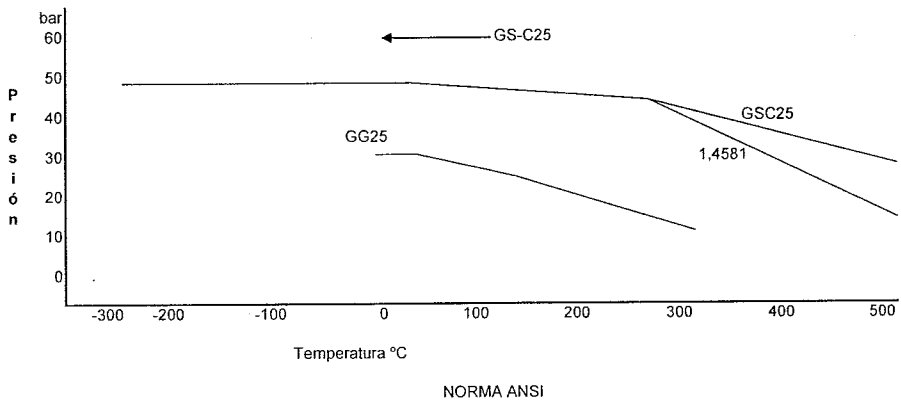
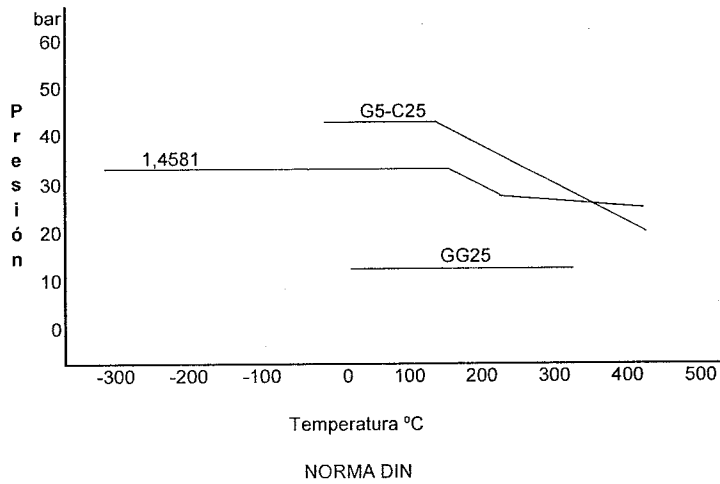


Fig. 7.4

Cabe señalar los puntos siguientes:

- Las conexiones roscadas se utilizan hasta 2";
- Las bridas pueden ser planas, con resalte, machihembradas, machihembradas con jaula de anillo;
- Las conexiones soldadas pueden ser de encaje o con soldadura a tope. Las primeras se emplean para tamaños de válvulas hasta 2" y las segundas desde 2 1/2" a tamaños mayores.

El cuerpo suele ser de hierro, acero y acero inoxidable y en casos especiales los materiales pueden ser de monel, hastelloy B oC, etc. En las tablas 7.1, 7.2 a y b figuran los materiales más empleados con su composición principal.

MATERIALES ESTANDAR PARA EL CUERPO DE LA VALVULA

Tipo	Especificacion ASTM	DIN	Composicion %									
			C max	Mn máx	Si máx	P máx	S máx	Cr	Ni	Mo	Otros	
Hierro fundido	GG 25											
	A 126-CLASE B*											
Acero al carbono	GS-C 25	0.25	0.8	0.5	0.05	0.05	3 max					
	A 216-WCB*	0.3	1.0	0.6	0.05	0.06						
Acero inox. 18/	1,4581	0.08	1.5	1.5	0.05	0.03	17-19,5	10,5-12,5	2-2,5	Nb>8 X % c		
	A 351 CF 10 Mc*	0.10	1.5	1.5	0.04	0.04	15-18	13-16	1,75-2,5	Nb>10 X % c		

Tabla. 7.1

Materiales especiales para el cuerpo de la valvula

Tipo	Especificacion DIN *ASTM	Composicion %									
		C max	Mn max	Si max	P max	S max	Cr	Ni	Mo	Otros	
Acero CrMo	7357	0.20	0.8	0.5	0.04	0.04	1-1,5		0,45-0,55		
	A 217-WC 6*	0.20	0.8	0.6	0.05	0.06	1-1,5		0,45-0,65		
Acero CrMo 5 %	7362	0.12	0.5	0.4	0.04	0.04	4-8,5		0,45-0,65		
	A 217-C 5*	0.20	0.7	0.75	0.05	0.06	4-6,5		0,45-0,65		
Acero Ni 3,5 %	5638	0.12	0.8	0.5	0.025	0.025		3,3-3,8			
	A 352-LC 3*	0.15	0.8	0.6		0.05		3,0-4,0			
Inox. 18/	4652	0.10	2	1.5	0.04	0.04	17,5-20	9,0-11,0		Nb>8 X % c	
	A 351-CF 8 C*	0.08	1.5	2	0.04	0.04	18-21	9,0-12,0		Nb>10 X % c	
Inox. 18/	4308	0.08	2	2	0.04	0.04	17,5-20	9,0-11,0			
	A 351-CF 8 C*	0.08	1.5	2	0.04	0.04	18-21	8,0-11,0			
Acero LC	4404	0.03	2	1	0.04	0.04	16,5-18,5	11,0-13,0	2-2,5		
	A 351-CF 3 M*	0.03	1.5	1.5	0.04	0.04	17-21	9,0-13,0	2,0-2,3		
Hastelloy B	Euzonit 70	0.03						62-65	28-32	Fe 1 max.	
	Hastelloy B	0.05						62-65	26-30	Fe 4-7 Co 2,5	
Hastelloy C	Euzonit 60	0.02					17	60	20	Fe 1 max.	
	Hastelloy C	0.08					15-17	54	15-17	Fe 7 W 3-4,5	
Monel	G-NiCu30Si2	0.35	1.5	2				62-68		Cu 28-33 Fe 2,5	
	Monel	0.3	1.5	1.5				62-68		Cu 28-32 Fe 3	
Bronce (OIkusil)	G-CuZn16Si4									Cu 80 Si 4 Zn 16	
	B 198-13 B									Cu 80 Si 4 Zn 16	

Tabla. 7.2 a

Materiales termoplásticos para el cuerpo de la válvula

Tipo	Resistencia a la tensión	Resistencia a la flexión	Resistencia a compresión	Dureza Rockwell	Temperatura máxima (° C)	Presión max (bar)
Cloruro Polivinilo (PVC)	480	1030	890	115	77	10
Cloruro Polivinilo Clorinado (CPVC)	620	1100	1030	118	107	10
Polipropileno (PP)	340	620	620	95	107	10
Polipropileno fibra vidrio (PPG)	690			107	122	10
Fluoruro Polivinilideno (PVDF)	510	960	960	110	137	10

Tab. 7.3 b

Empiezan a utilizarse nuevos materiales termoplásticos para el cuerpo de las válvulas. En la tabla 7.3 b pueden verse las características de algunos materiales.

En aplicaciones químicas hasta 140° C y 10 bar, las válvulas termoplásticas son elección en particular por su resistencia a la corrosión, abrasión y congelación, por su alta pureza y por su bajo coste. No son adecuadas en casos de fuerte vibración o en ambientes con posible abuso mecánico.

7.4 Tapa de la válvula

La tapa de la válvula de control tiene por objeto unir el cuerpo al servomotor. A través de la válvula se desliza el vástago del obturador accionado por el motor. Este vástago dispone generalmente de un índice que señala en una escala la posición de apertura o de cierre de la válvula.

Para que el fluido no se escape a través de la tapa es necesario dispone una caja de empaquetadura entre la tapa y el vástago. La empaquetadura ideal debe ser elástica, tener un bajo coeficiente de rozamiento, ser químicamente inerte y ser un aislante eléctrico, con el fin de no formar un puente galvánico con el vástago que dé lugar a una corrosión de partes de la válvula. La empaquetadura que se utiliza normalmente es de teflón cuya temperatura máxima de servicio es de 220° C. A temperaturas superiores o inferiores a este valor es necesario o bien emplear otro material o bien alejar la empaquetadura del cuerpo de la válvula para que se establezca así un gradiente de temperaturas entre el fluido y la estopada y esta última pueda trabajar satisfactoriamente.

La empaquetadura normal no proporciona un sello perfecto para el fluido. En el caso de fluidos corrosivos, tóxicos, radioactivos, o muy valiosos hay que asegurar un cierre total en la estopada. Los fuelles de estanqueidad lo proporcionan al estar unidos por un lado al vástago y por el otro a la tapa. La estanqueidad lograda es tan perfecta que las posibles fugas sólo pueden detectarse mediante ensayos realizados con un espectrómetro de masas.

Así pues, según las temperaturas de trabajo de los fluidos y el grado de estanqueidad deseada existen los siguientes tipos de tapas:

1. Tapa normal Fig 7.5a adecuada para trabajar a temperaturas del fluido variables entre 0 y 220° C.
2. Tapa con aletas de radiación Fig. 7.5b circulares o verticales que puede trabajar entre -20 a 450° C, recomendándose que por encima de 350° C, la válvula se monte invertida para facilitar el enfriamiento de la empaquetadura.
3. Tapa con columnas de extensión Fig. 7.5c. Las columnas son adecuadas cuando el fluido está a temperaturas muy bajas. Cómo guía en su selección se recomiendan las longitudes de la tabla 7.4.

Tamaño de la válvula en pulgadas	Temperaturas de trabajo	
	-21 a -80°C	-81 a -150°C
½ a 2½	400 mm	600 mm
3 a 6	600 mm	800 mm
8 a 12	800 mm	1000 mm

Tabla 7.4

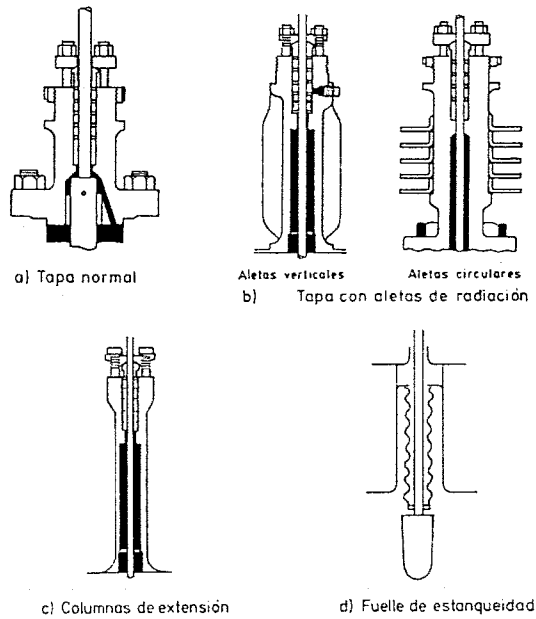


Fig. 7.5

4. Tapa con fuelle de estanqueidad Fig. 7.5d para temperaturas de servicio entre -20 y 450°C .

La caja de empaquetadura de la válvula consiste en unos anillos de estopada comprimidos por medio de una tuerca Fig. 7.6a o bien mediante una brida de presión regulable con dos tuercas Fig. 7.6b La empaquetadura puede ser apretada manualmente de modo periódico o bien ser presionada elásticamente con un muelle apoyado interiormente en la tapa Fig. 7.6

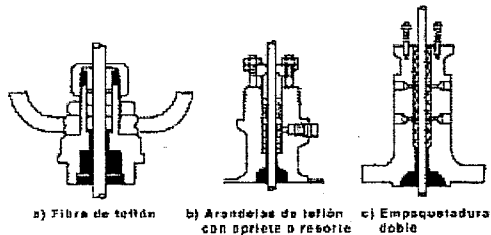


Fig. 7.6

La empaquetadura normal suele ser de aros de teflón, de selección en V, comprimidos con un resorte con la ventaja que el teflón es autolubricante y no necesita engrase. Cuando el fluido y las condiciones de servicio no permiten el empleo aislado del teflón se utiliza grafito en forma de filamento, laminado y cinta. El grafito sustituyó al amianto que fue dejado de utilizar por cuestiones de salud humana. El grafito tiene un coeficiente de dilatación semejante al metal del vástago, de modo que el choque térmico no es un problema. Su coeficiente de rozamiento es del orden de 7 a 1 veces mayor que el del teflón, por lo que siempre que sea posible debe emplearse éste.

No debe permitirse que se inicie una fuga porque es difícil solucionarlas después. El grafito en presencia de humedad puede darse lugar a una severa corrosión galvánica del vástago, con lo que puede presentarse fugas cuando el vástago empieza a moverse.

En los casos ñeque el fluido es tan tóxico que debe impedirse su fuga a través de la estopada y por alguna razón no pueden emplearse los fuelles de estanqueidad, se utilizan empaquetaduras dobles Fig.7.6c con dos collarines de lubricación. Esta disposición permite la inyección de gas inerte. Incluso, si pastes pequeñas del fluido se fugan, pueden recuperarse por succión a través de dichos collarines.

Existen diversos tipos de empaquetaduras según sean las presiones y temperaturas de trabajo y el tipo de fluido. En la tabla puede verse una guía de selección.

Descripcion	Presion max. (bar)	Campo de temperaturas ° C	Observaciones
Teflon en V (anti-corrosion)	40	180 a 200	Adecuado en general para todo tipo de productos Inadecuado para aceite y para productos que precipitan cristales o que contienen fangos
Perfluoroelastomero con anillos de teflon rellenos con fibras de grafito		0-250	Bajo nivel de fugas, bajo rozamiento, bajo mantenimiento
Grafito en filamento o laminado o en cinta			Fluidos no oxidantes 650-1650° C

Tabla 7.4

Las empaquetaduras con engrase están dejando de utilizarse por precisar de una válvula de engrase que periódicamente debe apretarse.

La Norma de Aire Limpio (Clean Air Act) de 1990 limita las fugas de fluidos químicos orgánicos volátiles desde las válvulas a la atmósfera. Su observancia ha conducido a los fabricantes de válvulas de controla rediseñar las empaquetaduras del vástago, que son la causa principal de las emisiones que se producen. Se han mejorado los materiales obteniendo una vida útil más larga sin degradación de la empaquetadura, y se ha conseguido un menor rozamiento con lo que no ha sido necesario pensar en aumentar el tamaño del actuador como en algunas aplicaciones de válvulas normales.

Las fugas en las empaquetaduras más usuales (aros de teflón en V,...) se deben a la pérdida de la carga axial debida al desgaste, y al choque térmico por los diferentes coeficientes de dilatación del acero del vástago y del material de la empaquetadura (el teflón 10 veces más que el acero). En las válvulas normales, la carga axial se mantiene apretando periódicamente la empaquetadura, lo que aparte de un mantenimiento más caro, comporta un mayor rozamiento de la estopada, con el correspondiente aumento de la histéresis y de la zona muerta de la válvula y un empeoramiento del control. Los nuevos sistemas de estopadas contienen aros de perfluroelastómetro (PFE) alternando con aros de teflón rellenos con fibra de grafito. Mientras que la estopada clásica de aros de teflón muestra fugas mayores de 500 ppm después de ser sometida a 10.000 – 40.000 ciclos, la nueva estopada después de 250.000 ciclos (3 años de funcionamiento) se mantienen todavía muy por debajo de las 500 ppm.

El mantenimiento normal de las válvulas con empaquetadura estándar consiste en inspecciones cuatrimestrales y en un programa activo de mantenimiento de las válvulas de la planta, la Norma de Aire Limpio permite efectuar únicamente inspecciones anuales.

7.5 Partes internas

Como partes internas de la válvula se consideran generalmente las piezas metálicas internas desmontables que están en contacto directo con el fluido. Estas piezas son el vástago, la empaquetadura, el collarín de lubricación en la empaquetadura (si se emplea), los anillos de guía del vástago, el obturador y el asiento o los asientos. Hay que señalar que el obturador y el asiento constituyen el “corazón de la válvula” al controlar el caudal gracias al orificio de paso variable que forman al variar su posición relativa, y que además tienen la misión de cerrar el paso del fluido.

Para seleccionar el obturador y los asientos interviene tres puntos principales:

1. Materiales normales y los especiales aptos para contrarrestar la corrosión, la erosión y el desgaste producidos por el fluido.
2. Características de caudal en función de la carrera.
3. Tamaño normal o reducido que permite obtener varias capacidades de caudal de la válvula con el mismo tamaño del cuerpo.

Materiales

El obturador y los asientos se fabrican normalmente en acero inoxidable porque este material es muy resistente a la corrosión y a la erosión del fluido. En las tablas Tabla 7.5 figuran los materiales estándar y los especiales utilizados en los obturadores y asientos.

Materiales estandar en las partes internas

Tipo	Especificacion DIN *ASTM	Composicion %								
		C max.	Mn max.	Si max.	P max.	S max.	Cr	Ni	Mo	Otros
Acero Inoxidable	4006	0.1	1	1	0.05	0.03	12,0-14,0			
	A 276 tipo 410*	0.15	1	1	0.04	0.03	11,5-13,5			
	4059	0.25	1	1	0.05	0.04	15,5-17,5	1,0-2,0		
	A 296-CB 300*	0.2	1	1.5	0.04	0.03	18-21	2 max.		
	4027	0.25	1	1	0.05	0.04	12,5-14,5			
	A 296 CA 15*	0.15	1	1.5	0.05	0.05	11,5-14	1	0.5	
Acero inox.	4580	0.1	2	1	0.05	0.03	16,5-18,5	10,5-13,5	2-2,5	Nb>8 X % c
	A 276 tipo 316*	0.08	2	1	0.05	0.03	16-18	10,0-14,0	2,0-3,0	
	4581	0.08	1.5	1.5	0.05	0.03	17-19,5	10,5-12,5	2-2,5	Nb>8 X % c
	A 35 CF 10Mc*	0.10	1.5	1.5	0.04	0.04	15-18	13-16	1,75-2,5	Nb>10 X % c

Tabla 7.5

Materiales especiales en las partes internas

Tipo	Especificacion DIN *ASTM	Composicion %								
		C max.	Mn max.	Si max.	P max.	S max.	Cr	Ni	Mo	Otros
Hastelloy B	Euzonit 70	0.03						62-65	28-32	Fe 1 max.
	Hastelloy B	0.05						62-65	26-30	Fe 4-7 Co 2,5
Hastelloy C	Euzonit 60	0.02					17	60	20	Fe 1 max.
	Hastelloy C	0.08					15-17	54	15-17	Fe 7 W 3-4,5
Monel	G-NiCu30Si2	0.35	1.5	2				62-68		Cu 26-33 Fe 2,5
	Monel	0.3	1.5	1.5				62-68		Cu 28-32 Fe 3
Stellite	8877	1					28			Co rest W 4,5
	Stellite, n.º 6	1.3					28			Co rest W 4,5
17-4PH endurecido	4540	0.07	1	1	0.04	0.03	17	4		Cu 4 Nb 0,3
	17-4 PH	0.05	1	1	0.04	0.03	17	4		Cu 4 Nb 0,3

Tabla 7.6

Cuando la velocidad del fluido es baja, pueden utilizarse PVC, fluorocarbonos y otros materiales blandos, solos o reforzados con fibras de vidrio o grafito. En algunas válvulas pueden utilizarse obturadores y asientos de cerámica.

Los materiales especiales resistentes a la corrosión y a la erosión tanto en el obturador y asientos como en el cuerpo se estudian más adelante.

7.6 Características de caudal

El obturador determina la característica de caudal de la válvula; es decir, la relación que existe entre la posición del obturador y el caudal de paso del fluido.

La característica de un fluido incompresible fluyendo en condiciones de presión diferencial constante a través de la válvula se denomina característica de caudal inherente y se representa usualmente considerando como abscisa la carrera del obturados de la válvula y como ordenadas el porcentaje de caudal máximo bajo una presión diferencial constante.

Las curvas características más significativas son la apertura rápida, la línea y la isoporcentual, siendo las más importantes estas dos ultimas. Otras curvas son las parabólicas y las correspondientes a las válvulas de tajadera, mariposa, Saunders, y con obturador excéntrico rotativo.

Las curvas características se obtienen mecanizando el obturador para que al variar la carrera el orificio de paso variable existente entre el contorno del obturador y el asiento configure la característica de la válvula. En a figura pueden verse varios tipos de obturadores cuya forma y mecanización determina esta característica.

El obturador con característica de apertura rápida tiene la forma de un disco plano. En la figura puede verse que el caudal aumenta mucho el principio de la carrera llegando rápidamente al máximo.

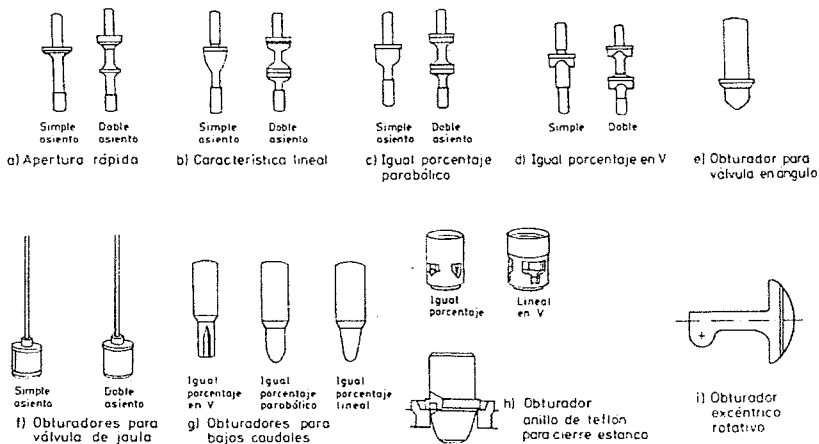


Fig. 7.7

En el obturador con característica de apertura rápida Fig. 7.7a tiene la forma de un disco plano. En la figura puede verse que el caudal aumenta mucho al principio de la carrera llegando rápidamente al máximo.

En el obturador con característica lineal Fig. 7.7b, f, g, i el caudal es directamente proporcional a la carrera según la ecuación:

$$q = Kl \quad (7.1)$$

En la que:

q = Caudal pérdida de carga constante

K = constante

l = Carrera de la válvula

La "rangeability" o campo de control de caudales que la válvula es capaz de regular manteniendo la curva característica inherente es en la válvula lineal de 15 a 1 o de 30 a 1. Si bien teóricamente podría ser infinita, las dificultades de fabricación la limitan a este valor.

En el obturador con característica isoporcentual cada incremento de carrera del obturador produce un cambio en el caudal que es proporcional al caudal que fluía antes de la variación. La ecuación correspondiente es:

$$\frac{dq}{dl} = a \cdot q \quad (7.2)$$

en la que:

q = Caudal pérdida de carga constante

l = Carrera

a = constante

De aquí: $\frac{dq}{q} = a dl$

E integrando

$$\int \frac{dq}{q} = a \int dl \quad (7.3)$$

Luego

$$q = be^{al}$$

En la que:

a y b son constantes

e = Base de los logaritmos neperianos

Si suponemos los valores siguientes:

$$\left. \begin{array}{l} l = 0 \quad q = q_{\text{mínimo}} = b \\ \\ l = 1 \quad q = q_{\text{máximo}} = q_{\text{mín}} e^a \end{array} \right\} \text{ luego } q = q_{\text{mín}} \left(\frac{q_{\text{máx}}}{q_{\text{mín}}} \right)^l \quad (7.4)$$

$$\text{y } \frac{q}{q_{\text{máx}}} = \frac{1}{\frac{q_{\text{máx}}}{q_{\text{mín}}}} \cdot \left(\frac{q_{\text{máx}}}{q_{\text{mín}}} \right)^l = \frac{1}{R} \cdot R^l$$

Que da el porcentaje de caudal e función del campo de control o “ranqueability” de la válvula.

$$\text{Y si } R = 50 \quad \frac{q}{q_{\text{máx}}} = 0,02 \cdot 50^l \quad (7.5)$$

La curva isoporcentual se caracteriza porque al principio de la carrera de la válvula, la variación de caudal es pequeña, y al final, pequeños incrementos en la carrera se traducen en grandes variaciones de caudal.

La curva característica parabólica corresponde a la ecuación

$$q = Kl^2 \quad (7.6)$$

Las curvas características de las válvulas de tajadera y mariposa pueden verse en la figura

Características de caudal efectivas

Hay que señalar que en la mayor parte de las válvulas que trabajan en condiciones reales, la presión diferencial cambia cuando varía la apertura de la válvula, por lo cual la curva real que relaciona la carrera de la válvula con el caudal, se aparta de la característica de caudal inherente. Esta nueva curva recibe el nombre de característica de caudal efectiva.

Como la variación de presión diferencial señalada depende de las combinaciones entre la resistencia de la tubería, y las características de las bombas y tanques del proceso, es evidente que una misma válvula instalada en procesos diferentes presentara inevitablemente curvas características efectivas distintas.

Sea, por ejemplo, un circuito típico de un proceso industrial formado por una bomba centrífuga, la válvula de control y la tubería. Es evidente que las características de

impulsión de la bomba y la pérdida de carga absorbida por el sistema varían según sea el grado de apertura de la válvula. En la figura puede verse que las diferencias entre la presión de impulsión de la bomba y la pérdida de carga de la tubería al variar el caudal corresponden a la pérdida de carga absorbida por la válvula y que ésta aumenta al disminuir el caudal.

Expresando la pérdida de presión de la válvula a su capacidad normal (apertura completa), con relación a la pérdida de carga del sistema (línea + válvula) se obtiene un coeficiente r . El valor de este coeficiente dependerá del tamaño relativo de la válvula con relación al de la tubería (menor \emptyset de válvula mayor valor de r) y de la resistencia de la tubería con relación al conjunto (menor resistencia mayor r). Para cada valor de r puede construirse una curva característica efectiva que se apartará de la curva inherente y que coincidirá con ella cuando $r = 1$, es decir, cuando la línea no absorbe presión y queda toda disponible para la válvula. Si el valor de r fuera muy pequeño la válvula de control absorbería muy poca presión y quedaría muy distorsionada la característica inherente

Selección de la característica de la válvula

Las curvas efectivas de las válvulas de control plantean un problema, el de la selección de la curva adecuada que satisfaga las características del proceso. Este punto no está suficientemente definido y es motivo de discusión constante motivada en parte por la falta de datos completos del proceso, de los cuales se carece a menudo: incluso a veces existe un desacuerdo aparente entre los estudios prácticos y teóricos realizados sobre la válvula.

Desde un punto de vista ideal, la característica efectiva de la válvula debe ser tal que el bucle de control tenga la misma estabilidad para todas las variaciones de carga del proceso. Un bucle de control es estable si la ganancia del bucle es menor que 1.

En el proceso la ganancia total del bucle de control equivale al producto de las ganancias del proceso, del transmisor, del controlador y de la válvula de control. Es decir, a:

$$G = \frac{\Delta v}{\Delta q} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta v} \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta q}{\Delta s} \quad (7.7)$$

Expresión en la que

Δq = variación de caudal del fluido de control

Δv = incremento de la variable del proceso

Δt = incremento de la señal de salida del transmisor

Δs = incremento de la señal de salida del controlador a la válvula de control

Para facilitar el estudio dinámico, el transmisor y la válvula de control se consideran incluidos dentro del proceso con lo cual la expresión anterior pasa a

$$G = \frac{\Delta s}{\Delta t} \times \frac{\Delta t}{\Delta s} \quad (7.8)$$

Es evidente que la válvula de control puede modificar la ganancia del bucle. De aquí la conveniencia de estudiar esta influencia a fin de que las variaciones que produzca sobre la ganancia total del bucle no den lugar a inestabilidad en el proceso para algunos puntos o en toda la carrera de la válvula.

Para simplificar el estudio consideremos que las ganancias del transmisor y del controlador son constantes.

Señalemos que muchos procesos son lineales, es decir, sus ganancias se mantienen constantes $\left(\frac{\Delta v}{\Delta q} = cte\right)$. Así sucede en el Control de nivel de caudal con señal lineal.

En otros procesos la ganancia deja de ser constante tal como ocurre en el control de presión, en la medida de caudal con diafragma y en el control de temperatura en un intercambiador.

En el control de presión de la figura la ganancia del proceso es $\frac{\Delta v}{\Delta q}$

Aplicando la formula clásica de las válvulas de control resulta

$$q = K_v \sqrt{\frac{v - p_o}{\rho_o}} \quad (7.9)$$

q = caudal

K_v = constante

v-p_o = presión diferencial

ρ_o = densidad de flujo

$$v - p_o = \frac{q^2}{K_v^2} \cdot \rho_o \quad (7.10)$$

Con lo cual

$$\frac{\Delta v}{\Delta q} = \frac{2q}{K_v^2} \cdot \rho_o \quad (7.11)$$

Expresión en la que puede verse que la ganancia del proceso es directamente proporcional al caudal del producto.

En el control de caudal medido con una placa-orificio la ganancia del proceso equivale a la relación.

$$\frac{\Delta v}{\Delta q} = \frac{\Delta h}{\Delta q} = \frac{dh}{dq} = \frac{2q}{K^2} \quad (7.12)$$

Siendo q el caudal, K una constante y h la presión diferencial generada por la placa-orificio. Esta ganancia es, pues, directamente proporcional a caudal.

En los procesos de regulación de temperatura en intercambiadores de calor la ganancia es inversamente proporcional al caudal del producto. En efecto, sea por ejemplo el control de temperatura realizado mediante un fluido térmico y representado en la figura para un producto que, para simplificar, consideramos agua.

Se verifica la ecuación:

$$Q \cdot 1 \cdot v = q \cdot c \cdot t_f \quad (7.13)$$

En la que:

Q = caudal de agua

v = temperatura de salida

q = caudal de fluido térmico

c = calor específico del fluido térmico

t_f = Temperatura del fluido térmico

Habiendo considerado que el rendimiento de la instalación es la unidad y que la temperatura de referencia es 0° C.

Luego derivando la expresión anterior con relación a q resulta

$$Q \frac{dv}{dq} = ct_f \quad (7.14)$$

Luego

$$\frac{dv}{dq} = \frac{ct_f}{Q} \quad (7.15)$$

Es decir, que la ganancia del proceso es inversamente proporcional a los cambios de carga del producto.

Existen varios factores de no linealidad que alteran las características de caudal supuestas. Entre estos factores se encuentran las características de caudal supuestas. Entre estos factores se encuentran:

- Exceptuando las válvulas del movimiento rotativo, en las proximidades del cierre, las curvas reales de caudal se apartan de las teóricas.
- El área del diafragma del servomotor neumático y la fuerza de la presión diferencial sobre el obturador, en relación a la carrera, no son constantes, si bien el problema puede solucionarse suficientemente con los posicionadores.
- La curva característica de caudal en los líquidos es distinta en los gases y vapores.

Así pues cuando se consideran los cambios de carga y las perturbaciones reales que pueden presentarse puede ocurrir muy bien que no exista ninguna válvula de control comercial que compense totalmente las variaciones de ganancia del proceso, en cuyo caso la selección de la válvula será un compromiso entre la estabilidad del bucle y su rapidez de respuesta ante las perturbaciones. Examinaremos ahora la ganancia de la válvula de control.

La ganancia de la válvula de control viene expresada como la relación entre el incremento del caudal de salida y el incremento en la señal de entrada. Como en la práctica la variación en la señal de entrada es casi lineal con la carrera, puede admitirse que la ganancia equivale a

$$\frac{dq_e}{dl} \quad (7.16)$$

Siendo q_e el caudal efectivo de paso por la válvula y l la carrera.

Por otro lado,

$$\frac{dq_e}{dl} = \frac{dq_e}{dq_i} \cdot \frac{dq_i}{dl} \quad (7.17)$$

Siendo q_i la característica inherente de la válvula.

Luego de la expresión

$$q_e = \frac{1}{\sqrt{1-r + \frac{r}{q_i^2}}} \quad (7.18)$$

Resulta

$$\frac{dq_e}{dq_i} = -\frac{1}{2} \cdot \left(1 - r + \frac{r}{q_i^2}\right)^{-3/2} \cdot \left(-\frac{r \cdot 2q_i}{q_i^4}\right) = \frac{r}{q_i^3} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - r + \frac{r}{q_i^2}\right)^3}} \quad (7.19)$$

Y si la válvula es lineal ($q_i = K \cdot l$) resulta

$$\frac{dq_i}{dl} = K \quad (7.20)$$

Si la válvula es isoporcentual con “rangeability” 50 ($q_i = 0,02 \times 50^l$) resulta

$$\frac{dq_i}{dl} = 0,02 \times 50^l \cdot \ln 50 = q_i \cdot \ln 50 \quad (7.21)$$

Con lo cual la ganancia en la válvula lineal es

$$\frac{dq_e}{dl} = \frac{r}{K^3 l^3} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - r + \frac{r}{K^2 l^2}\right)^3}} \cdot K \quad (7.22)$$

Y en la válvula isoporcentual es:

$$\frac{dq_e}{dl} = \frac{r}{(0,02 \times 50^l)^3} \cdot \frac{0,02 \times 50^l \cdot \ln 50}{\sqrt{\left(1 - r + \frac{r}{(0,02 \times 50^l)^2}\right)^3}} \quad (7.23)$$

Como es natural, si considerásemos sólo las características inherentes las ganancias serían:

Válvula lineal

$$\frac{dq_i}{dl} = K \quad (7.24)$$

Válvula isoporcentual con

$$\frac{dq_i}{dl} = q \cdot \ln 50 \quad (7.25)$$

“rangeability” 50, $e^a = 50$

Estas últimas ecuaciones nos indican que la válvula lineal tiene ganancia constante y que en la válvula isoporcentual la ganancia es directamente proporcional al caudal.

En los procesos lineales, con ganancia constante –nivel, caudal con señal lineal- interesará que la válvula se comporte también linealmente, es decir, que tenga ganancia constante a fin de no cambiar la ganancia total del bucle. Así pues, en estos procesos lineales, la válvula isoporcentual es la más adecuada para r menor de 0,4 ya que su característica efectiva se aproxima a la curva característica lineal.

Según se verá más adelante, la pérdida de carga que se considera en el cálculo de la válvula de control suele ser de 30% de la pérdida de carga total del sistema. Con esta práctica es obvio que la válvula más idónea a emplear es la isoporcentual. Así mismo, aceptando que la válvula automática debe absorber una pérdida de carga determinada para realizar bien sus funciones de control, cuando mayor sea ésta con relación a la total del sistema (r lo mayor posible) tanto más preferible será la selección de una válvula lineal.

En los procesos de caudal y de control de temperatura estudiados en que la ganancia era directamente proporcional al caudal de la válvula e inversamente proporcional al caudal del producto respectivamente es preferible la característica isoporcentual

En efecto en la característica isoporcentual inherente de la válvula con “rangeability” 50, la ganancia es $q \ln 50$ directamente proporcional al caudal, lo que compensa bastante las variaciones de ganancia del proceso. Al ir disminuyendo el valor de r la válvula tiende a una característica lineal con ganancia casi constante y la compensación existirá para caudales bajos hasta la mitad de la carrera aproximadamente; esto indica que un bucle de control ajustado a valores bajos de demanda de caudal del fluido de control, es decir, con la válvula sobredimensionada se volverá “perezoso” para valores altos ya que en esta zona la ganancia de la válvula será pequeña.

Hay que señalar que la ganancia de la válvula isoporcentual de la figura suele presentar picos por encima del valor unidad, de tal modo que es posible que en procesos determinados se presenten inestabilidades en algunos puntos de la carrera de la válvula. Estas anomalías pueden corregirse disminuyendo la ganancia del controlador con lo que desaparece estos puntos o zonas de inestabilidad, pero entonces el caudal se vuelve más perezoso en los restantes puntos de la carrera, siendo más lenta la respuesta del sistema. Este fenómeno podría subsanarse con una válvula de curva característica especial, pero ello es antieconómico y difícil de realizar porque esta curva característica debería calcularse desarrollando cálculos teóricos engorrosos que en general no sería factible efectuar por el desconocimiento de los datos completos del proceso.

Si en algún caso la característica de la válvula no es la adecuada para el proceso a controlar, puede acudirse a sustituir el obturador o bien a emplear un posicionador con levas adecuadas que modifiquen la característica

7.7 Corrosión y erosión en las válvulas

No existe actualmente ningún material que resista la corrosión de todos los fluidos, por lo cual en muchos casos es necesario utilizar materiales combinados cuya selección dependerá del medio específico donde deban trabajar.

La tabla 7.7a permite seleccionar los materiales resistentes a la corrosión, debiendo señalar que sólo constituye una guía sin ser una recomendación exacta ya que la gran variedad de condiciones de servicio puede alterar las características de resistencia del material; realmente, la selección particular de un material específico dependerá de las pruebas experimentales a que se someta en el proceso.

Fluido corrosivo	Condiciones		13-Cr Acero	Austenita S.S. (304)	Hierro fundido (316)	Hierro fundido Carpentier 20	Inconel	Monel	Haste-loy B	Haste-loy C	Haste-loy D	Aluminio	Níquel	Cobre	Plomo	Titanio	
	Concentración (%)	Temperatura (°C)															
Ácido clorhídrico	≤ 1	≤ 30	C	C	B	B	B	B	A	A	B	B	B	B	B	A	
		≤ 50	C	C	C	B	B	B	A	A	B	C	B	C	C	A	
		< punto ebullición	C	C	C	B	C	B	B	A	> 70°C	C	C	B	C	C	C
	1 ~ 5	≤ 30	C	C	B	B	B	B	A	A	B	C	B	B	B	C	A
		≤ 50	C	C	C	B	B	B	≤ 75°C	A	≤ 70°C	C	C	B	C	C	A
		< punto ebullición	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	C	C
	5 ~ 10	≤ 30	C	C	C	B	B	B	A	A	B	C	B	B	B	B	B
		≤ 70	C	C	C	≤ 50°C	C	C	C	A	≤ 50°C	C	C	C	C	C	C
		< punto ebullición	C	C	C	C	C	C	C	B	C	C	C	C	C	C	C
	10 ~ 20	≤ 30	C	C	C	B	B	B	A	A	B	C	B	B	B	B	B
		≤ 70	C	C	C	≤ 50°C	C	C	C	A	≤ 50°C	C	C	C	C	C	C
		< punto ebullición	C	C	C	C	C	C	C	B	C	C	C	C	C	C	C
	> 20	≤ 30	C	C	C	C	C	C	C	A	B	C	C	B	C	< 30%	C
		≤ 80	C	C	C	C	C	C	C	A	C	C	C	C	C	< 30%	C
		< punto ebullición	C	C	C	C	C	C	C	B	C	C	C	C	C	C	C

Tabla 7.7 a

Fluido corrosivo	Condiciones		13-Cr Acero	Austenita S.S. (304)	Austenita S.S. (316)	Hierro fundido alto Si	Carpenter 20	Inconel	Monel	Haste-loy B	Haste-loy C	Haste-loy D	Alumio	Niquel	Cobre	Plomo	Titanio	
	Concentración (%)	Temperatura (°C)																
Hidróxido códico	10	HA 30	B	A	A	B	A	A	A	A	A	A	C	A	B	B	A	
		HA 90	B	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A	C	A	B	B	A
		< punto ebullición	B	A	A	C	A	A	A	A	A	A	A	C	A	B	C	A
	10 ~ 30	HA 30	B	A	A	B	A	A	A	A	A	B	C	A	B	B	A	A
		HA 100	C	A	A	C	A	A	A	A	A	B	C	A	A	B	C	A
		< punto ebullición	C	B	B	C	A	A	A	A	A	B	C	A	C	C	C	A
	30 ~ 50	HA 30	B	A	A	B	A	A	A	A	A	B	C	A	C	C	A	A
		HA 100	C	A	A	C	A	A	A	A	A	B	C	A	C	C	C	B
		< punto ebullición	C	B	B	C	A	A	A	A	A	B	C	A	C	C	C	B
	50 ~ 70	HA 30	C	A	A	B	A	A	A	—	—	B	C	A	C	C	A	A
		HA 80	C	A	A	C	A	A	A	—	—	B	C	A	C	C	C	B
		< punto ebullición	C	A	A	B	A	A	A	—	—	B	C	A	C	C	C	B
70 ~ Anhidro	HA 260	C	B	B	C	B	B	B	—	—	C	C	A	C	C	C	B	
	Solución NaOH HA 480	C	C	C	C	C	B	B	—	—	C	C	A	C	C	C	B	
Amoniaco	< 28	< 100	B	A	A	B	A	A	C	A	A	C	A	C	C	—	—	
Amoniaco vapor	< 100	< 100	B	A	A	B	A	A	C	A	A	C	A	C	C	—	—	
Amoniaco anhidro	100	< 300	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A	C	A	A	

Fluido corrosivo	Condiciones		13-Cr Acero	Austenita S.S. (304)	Austenita S.S. (316)	Hierro fundido alto Si	Carpenter 20	Inconel	Monel	Haste-loy B	Haste-loy C	Haste-loy D	Alumio	Niquel	Cobre	Plomo	Titanio	
	Concentración (%)	Temperatura (°C)																
Hidróxido códico	10	HA 30	B	A	A	B	A	A	A	A	A	A	C	A	B	B	A	
		HA 90	B	A	A	C	A	A	A	A	A	A	C	A	B	B	A	
		< punto ebullición	B	A	A	C	A	A	A	A	A	A	C	A	B	C	A	
	10 ~ 30	HA 30	B	A	A	B	A	A	A	A	A	B	C	A	B	B	A	A
		HA 100	C	A	A	C	A	A	A	A	A	B	C	A	B	C	A	
		< punto ebullición	C	B	B	C	A	A	A	A	A	B	C	A	C	C	A	
	30 ~ 50	HA 30	B	A	A	B	A	A	A	A	A	B	C	A	C	C	A	A
		HA 100	C	A	A	C	A	A	A	A	A	B	C	A	C	C	C	B
		< punto ebullición	C	B	B	C	A	A	A	A	A	B	C	A	C	C	C	B
	50 ~ 70	HA 30	C	A	A	B	A	A	A	—	—	B	C	A	C	C	A	A
		HA 80	C	A	A	C	A	A	A	—	—	B	C	A	C	C	C	B
		< punto ebullición	C	A	A	B	A	A	A	—	—	B	C	A	C	C	C	B
70 ~ Anhidro	HA 260	C	B	B	C	B	B	B	—	—	C	C	A	C	C	C	B	
	Solución NaOH HA 480	C	C	C	C	C	B	B	—	—	C	C	A	C	C	C	B	
Amoniaco	< 28	< 100	B	A	A	B	A	A	C	A	A	C	A	C	C	—	—	
Amoniaco vapor	< 100	< 100	B	A	A	B	A	A	C	A	A	C	A	C	C	—	—	
Amoniaco anhidro	100	< 300	A	A	A	A	A	A	C	A	A	A	A	A	C	A	A	

Tabla 7.7 a

Fluido corrosivo	Concentración (%)	Condiciones		13-Cr Acero	Austenita S.S. (304) (316)	Hierro fundido Carpen-ter 20 Si	Inconel	Monel	Haste-loy B	Haste-loy C	Haste-loy D	Alumi-nio	Niquel	Cobre	Plomo	Titanio		
		Temperatura (°C)																
Ácido sulfúrico	95 ~ 100	< punto ebullición	IIA 30	C	A	A	A	—	C	A	A	A	C	C	C	—	C	
			IIA 70	C	B	B	A	—	C	B	B	A	C	C	C	C	—	C
			IIA 30	C	C	C	A	—	C	C	C	A	C	C	C	C	—	C
	> 100	< punto ebullición	IIA 30	C	A	A	—	A	—	C	C	C	—	C	C	C	—	—
			IIA 60	C	A	A	—	A	—	C	C	C	—	C	C	C	—	—
			IIA 30	C	A	A	A	A	—	C	C	A	C	B	C	C	C	A
	IIA 0,5	< punto ebullición	IIA 30	A	A	A	A	A	—	C	C	A	C	C	C	C	C	A
			IIA 60	B	A	A	A	A	—	C	C	A	C	C	C	C	C	A
			IIA 30	A	A	A	A	A	—	C	C	A	C	C	C	C	C	A
	0,5 ~ 20	< punto ebullición	IIA 30	B	A	A	A	A	—	C	C	A	C	C	C	C	C	A
IIA 60			B	A	A	A	A	—	C	C	A	C	C	C	C	C	A	
IIA 30			C	A	A	A	A	—	C	C	—	C	C	C	C	C	A	
20 ~ 40	< punto ebullición	IIA 30	B	A	A	A	A	—	C	C	A	C	C	C	C	C	A	
		IIA 60	B	A	A	A	A	—	C	C	A	C	C	C	C	C	B	
		IIA 30	C	A	A	A	A	—	C	C	—	C	C	C	C	C	B	
40 ~ 70	< punto ebullición	IIA 30	C	A	A	A	A	—	C	C	—	C	B	C	C	C	A	
		IIA 60	C	B	B	A	B	—	C	C	—	C	C	C	C	C	B	
		IIA 30	C	A	A	A	A	—	C	C	—	C	B	C	C	C	A	
70 ~ 80	< punto ebullición	IIA 30	C	C	C	A	C	—	C	C	—	C	C	C	C	C	B	
		IIA 70	C	C	C	A	C	—	C	C	—	C	C	C	C	C	B	
		IIA 30	C	C	C	A	C	—	C	C	—	C	C	C	C	C	B	

Fluido corrosivo	Concentración (%)	Condiciones		13-Cr Acero	Austenita S.S. (304) (316)	Hierro fundido Carpen-ter 20 Si	Inconel	Monel	Haste-loy B	Haste-loy C	Haste-loy D	Alumi-nio	Niquel	Cobre	Plomo	Titanio		
		Temperatura (°C)																
Ácido nítrico	80 ~ 95	< punto ebullición	IIA 30	C	A	A	A	—	C	C	—	C	A	C	C	C	A	
			IIA 70	C	B	B	A	B	—	C	C	—	C	B	C	C	C	B
			IIA 30	C	B	B	A	B	—	C	C	—	C	A	C	C	C	B
	> 95	< punto ebullición	IIA 50	C	C	C	A	C	—	C	C	—	C	B	C	C	C	B
			IIA 30	C	C	C	A	C	—	C	C	—	C	B	C	C	C	B
			IIA 30	C	A	A	A	A	—	B	A	A	A	C	B	B	A	A
	IIA 5	< punto ebullición	IIA 60	C	C	A	A	B	—	B	70°C	A	A	C	C	B	A	A
			IIA 30	C	C	A	A	A	C	—	C	A	A	C	C	C	B	B
			IIA 30	C	B	A	A	A	B	—	A	A	A	C	B	B	A	A
	5 ~ 25	< punto ebullición	IIA 90	C	C	A	A	B	—	B	A	A	C	C	—	B	A	C
IIA 30			C	C	A	A	A	C	—	C	A	A	C	C	C	B	C	
IIA 90			C	C	A	A	A	B	—	B	A	A	C	B	B	A	A	
25 ~ 50	< punto ebullición	IIA 30	C	C	B	A	A	C	—	C	A	B	C	C	C	B	C	
		IIA 90	C	C	A	A	A	B	—	B	A	A	C	C	B	A	A	
		IIA 30	C	C	A	A	A	B	—	B	A	A	C	C	B	A	A	
50 ~ 85	< punto ebullición	IIA 90	C	C	—	120°C	A	A	B	B	A	A	C	C	—	B	A	
		IIA 30	C	C	C	A	A	C	—	C	A	C	C	C	C	C	C	
		IIA 30	C	C	C	A	A	C	—	C	A	C	C	C	C	C	C	
SO ₂ húmedo	IIA 30		C	A	A	C	A	C	C	C	A	C	A	C	B	A	A	
		IIA 100	C	B	A	C	A	C	C	C	A	C	A	B	B	C	B	
Ácido sulfuroso	IIA 200		C	C	A	C	A	C	C	C	A	C	A	B	C	C	—	
SH ₂ húmedo			C	B	B	A	A	—	B	—	A	—	A	B	C	—	A	

Tabla 7.7 a

Cuando el material resistente a la corrosión es caro o no adecuado, pueden utilizarse materiales de revestimiento, tales como plásticos, fluorocarbonos, elastómeros, vidrio plomo y tantalio. Como es lógico, el revestimiento no debe fallar pues el fluido atacaría el metal base y la válvula se perforaría.

La erosión se produce cuando partículas a alta velocidad en el seno del fluido chocan contra la superficie del material de la válvula. En esas condiciones se encuentran en la vaporización de un líquido, con arena, fangos, etc. La posible presencia del fenómeno de la erosión ante el gran número de fluidos y la gran variedad de condiciones de servicio que se encuentran actualmente en la industria obliga a seleccionar el tipo y material del cuerpo y del obturador a fin de resistirla, en particular en condiciones extremas de presión diferencial y de temperatura.

Los materiales termoplásticos son resistentes a la corrosión frente a muchos materiales químicos (ácido sulfúrico, ácido nítrico, etc.) y poseen unas buenas características dieléctricas (de 0.9ª 1,18kv/m con el ensayo ASTM D149). No resisten las vibraciones mecánicas, pero pueden ser el material de recubrimiento de metales para manejar las dos condiciones, corrosión y vibraciones. En la tabla pueden verse sus características.

Frente a la erosión los materiales termoplásticos tiene el doble de duración que los metálicos en los casos en el que el caudal no supera los 3m/s y el tamaño de las partículas flotantes en el líquido no superan los 300mesh. El desgaste por abrasión por día para dos materiales termoplásticos comprado con el hierro fundido es:

Cloruro de Polivinilo (PVC)	0,10 gramos/día	0,07 cm ³ /día
Polipropileno (PP)	0,13 gramos/día	0,14 cm ³ /día
Hierro fundido	7,85 gramos/día	1,12 cm ³ /día

Figuran a continuación en orden decreciente de resistencia a la erosión, los tipos de válvulas más adecuados.

1. Válvula en ángulo de simple asiento, con obturador contorneado –fluido tendiendo a cerrar.
2. Válvula de jaula de cierre estanco
3. Válvula de globo de simple asiento con obturador contorneado
4. Válvula de globo de simple asiento con obturador en V
5. Válvula de jaula equilibrada
6. Válvula de globo de doble asiento con obturador contorneado
7. Válvula de globo de doble asiento con obturador en V contorneado

Nótese que la válvula de doble asiento sometida a una alta presión diferencia tiene una velocidad de fuga del fluido elevada cuando está próxima a la posición simple asiento que casi no tiene fugas.

Asimismo un obturador contorneado es más adecuado que uno en V; éste distribuye el flujo de fluido a través de uno o dos de los orificios en V mientras que el primero lo hace alrededor de la periferia del obturador.

La válvula en ángulo es más favorable que la de globo ya que su cuerpo y su obturador no están sometidos a un tan alto grado de variación de recorrido del fluido.
 En la tabla figuran estos materiales especiales resistentes a la erosión con el tipo de recubrimiento que se les aplica.

Materiales DIN	Denominación	C	Cr	Ni	Fe	Cu	Nb	W	Co	Si	Mn	B	Dureza a 20° C	Dureza a 400° C	Temp. máx. de servicio °C
1.8877	Stellite n.º 6	1,1	30	3,0	3,0	—	—	4,5	66	1,5	—	—	38-44	33	500
1.4034	—	0,45	13	—	Equil.	—	—	—	—	1,0	1,0	—	54-57	—	300
1.4540	17-4 PH	0,05	17	4,0	Equil.	4,0	0,3	—	—	1,0	1,0	—	40-47	33-36	450
—	Colmonoy n.º 5	0,65	11,5	77	4,25	—	—	—	—	3,75	—	2,5	45-50	40-46	700

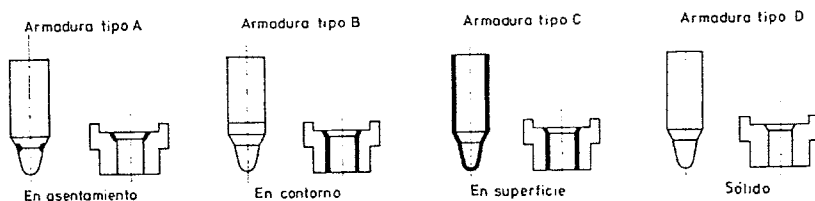


Tabla 7.8

La utilización de estos materiales exige respetar unos límites de presión diferencial y de temperatura en el obturador y el asiento, que puede verse en la tabla

7.8 Servomotores

Los servomotores pueden ser neumáticos, eléctricos, hidráulicos y digitales, si bien se emplean generalmente los dos primeros por ser más simples, de actuación rápida y tener una gran capacidad de esfuerzo. Puede afirmarse que el 90% de las válvulas utilizadas en la industria son accionadas neumáticamente.

Los servomotores hidráulicos consisten en una bomba de accionamiento eléctrico que suministra fluido hidráulico a una servoválvula. La señal del instrumento de control actúa sobre la servoválvula que dirige el fluido hidráulico a los dos lados del pistón actuador hasta conseguir, mediante una retroalimentación, la posición exacta de la válvula. Se caracterizan por ser extremadamente rápidos, potentes y suaves, si bien su coste es elevado, por lo que sólo se emplean cuando los servomotores neumáticos no pueden cumplir con las especificaciones de servicio.

Las válvulas digitales disponen de compuertas neumáticas accionadas por electroválvulas que, a su vez, son excitadas por la señal de salida binaria de un microprocesador. Su respuesta es muy rápida (una compuerta 500ms), y el grado de abertura depende de la combinación de las compuertas (8 compuertas darán 1, 2, 4,... 128 relaciones de capacidad). Aunque estas válvulas están limitadas a fluidos limpios y no corrosivos, presentan interés para el mando digital directo, si bien su velocidad de apertura instantánea no representa una ventaja esencial frente a las válvulas neumáticas industriales (5 a 20 segundos según el tamaño), y su coste es elevado.

Servomotor neumático

El servomotor neumático Fig. 7.9 consiste en un diafragma con resorte que trabaja (con algunas excepciones) entre 3 y 15 psi (0,2-1 bar), es decir, que las posiciones extremas de la válvula corresponden a 3 y 15 psi (0,2 y 1 bar).

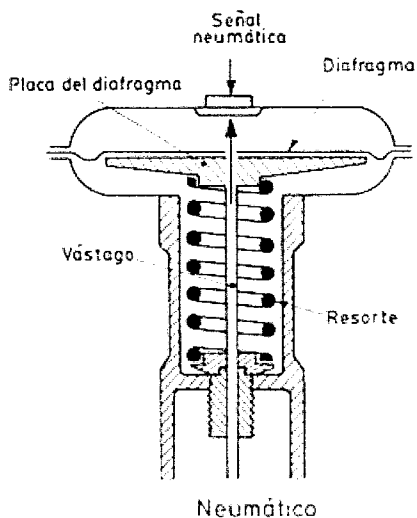


Fig. 7.9

Al aplicar una cierta presión sobre el diafragma, el resorte se comprime de tal modo que el mecanismo empieza a moverse y sigue moviéndose hasta que se llega a un equilibrio entre la fuerza ejercida por la presión del aire sobre el diafragma y la fuerza ejercida por el resorte

Idealmente con una señal de 3 psi (0,2 bar) la válvula debe estar en la posición 0 de su carrera y para una señal de 15 psi (1 bar) en la posición 100. Asimismo, debe existir una proporcionalidad entre las señales intermedias y sus correspondientes posiciones. En la práctica las válvulas de control se desvían de este comportamiento debido a las causas siguientes:

1. Rozamiento en la estopada
2. Histéresis y falta de linealidad del resorte que son poco importantes desde el punto de vista de este estudio práctico.
3. Área efectiva del obturador que varía con la carrera del vástago de la válvula.
4. Esfuerzo en el obturador de la válvula creado por la presión diferencial del fluido.
5. Fuerza adicional del servomotor y el asiento (fuerza de asentamiento)

En la válvula existe un equilibrio entre estas diversas fuerzas que viene dado por la siguiente formula Fig. 7.10

$$F_a \geq F_r + F_s + F_w + F_{b1} \pm F_{b2} + F_p \quad (7.26)$$

En la que:

F_a = Fuerza resultante obtenida por el servomotor, en Kg

F_r = Fuerza de rozamiento, en Kg

F_s = Fuerza de asentamiento, en Kg

F_w = Peso del obturador, en Kg

F_{b1} = Fuerza elástica del fuelle de estanqueidad, e Kg.

F_{b2} = Fuerza de desequilibrio del fuelle de estanqueidad, en Kg

F_p = Ferza estática y dinámica sobre el obturador, en Kg

La fuerza resultante F_a obtenida por el actuador depende de la acción de la válvula (aire cierra, aire abre). En la válvula de acción directa (aire cierra) vale:

$$F_a = A_d \cdot P_a \times 1,02 - F_{st} = A_d (P_a - F_2) \times 1,02 \quad (7.27)$$

con

$$F_{st} = A_d F_2 \times 1,02 \quad (7.28)$$

en la que:

A_d = Área efectiva del diafragma, en cm^2

P_a = Presión del aire sobre el diafragma, en bar

F_{sr} = Fuerza debida a la compresión sinal del muelle a carrera total, en kg

F_2 = Compresión final del muelle a carrera total, en bar

En la válvula de acción inversa (aire abre) es:

$$F_a = A_d F_1 \times 1,02 \quad (7.29)$$

en la F_1 = compresión inicial del muelle a carrera cero, en bar.

Los fabricantes de válvulas normalizan los tamaños de los servomotores de acuerdo con el tamaño de los cuerpos de las válvulas donde van montados. A veces ocurre que la fuerza que proporciona un servomotor estándar no es suficiente y es necesario utilizar un actuador sobredimensionado que para el mismo campo de compresión permita una mayor fuerza gracias a su mayor área efectiva en el diafragma y a la mayor carrera del vástago del obturador.

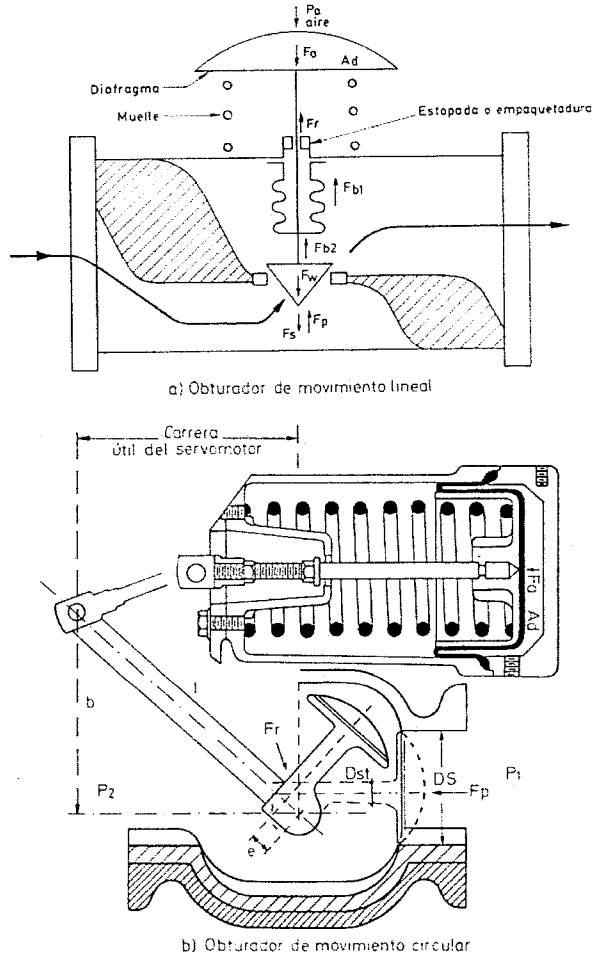


Fig. 7.10

Hay que señalar que los muelles que se oponen al diafragma poseen las características siguientes:

Margen de compresión. Por ejemplo, 3 a 15 psi (0,2-1 bar).

Carrera

Gradiente. Fuerza requerida para comprimir el muelle 1cm

Flexión total. Centímetros de longitud con que el muelle puede comprimirse hasta que las espiras se toquen y sea imposible una compresión ulterior.

Para asegurar que las espiras del muelle no se toquen entre sí se acostumbra a utilizar solamente entre el 80 y 85% de la flexión total como máximo. Esto significa que restando de los cm de flexión total la carrera de la válvula queda como remanente la longitud de compresión inicial del muelle. Es decir, esta compresión inicial en centímetros multiplicada por el gradiente del muelle. Es decir, esta compresión inicial en centímetros multiplicada por el gradiente del muelle es igual a la fuerza que ejerce el resorte cuando hay señal neumática en el servomotor.

En válvulas de acción directa (aire cierra) cuando más bajo sea el campo de trabajo del muelle tanta más fuerza se dispondrá para la misma señal neumática.

Disminuyendo la compresión inicial del muelle se obtiene una compresión final más baja.

La fuerza de rozamiento F_r en la estopada se produce entre el vástago de la válvula y la empaquetadura y depende del tipo de empaquetadura (teflón, teflón-asbestos, grafito-asbestos, etc.) de su longitud, de la compresión a que está sometida, de la temperatura, de los coeficientes de rozamiento estático y dinámico, del estado de la superficie del vástago..., etc. Es prácticamente imposible calcular exactamente estas influencias en una válvula de control. Una regla práctica da los valores siguientes:

Tipo de empaquetadura

Apriete con resorte	$\frac{1}{2}$	a	$1\frac{1}{4}$ "	5 Kg	
	$1\frac{1}{2}$	a	$2\frac{1}{2}$ "	10 Kg	
	3	a	12"	15 Kg	
Ajuste manual		$\frac{1}{2}$	a	$1\frac{1}{4}$ "	10 Kg
		$1\frac{1}{2}$	a	$2\frac{1}{2}$ "	20 Kg
		3	a	12"	30 Kg

La válvula con obturador de movimiento circular y con servomotor de acoplamiento directo con oscilación libre del vástago, sólo tienen un rozamiento en la estopada en la superficie en contacto con el árbol de giro del obturador.

La fuerza de asentamiento permite cerrar la válvula y conseguir que la fuga de fluido sea mínima: su valor depende del grado de mecanización del asiento y del obturador.

La fuerza de asentamiento en Kg equivale aproximadamente a 0,25-0,75 veces la circunferencia en cm del aro del asiento. Puede aplicarse la fórmula general con un valor medio de 0,5:

$$F_s = 0,5 \pi D_s \quad (7.30)$$

En la que:

F_s = fuerza de asentamiento, en Kg

D_s = \emptyset interior del asiento, en cm

En las válvulas con obturador de movimiento circular, la fuerza de asentamiento se ve facilitada por la relación de brazos de palanca del acoplamiento entre el vástago del servomotor y el árbol del obturador. Esta relación es de 3 o más, con lo cual el servomotor puede ser más pequeño que en la válvula con obturador de movimiento lineal. Por otro lado, el rozamiento en posición de cierre de las válvulas de obturador excéntrico y de mariposa sólo se presenta para ángulos de apertura muy pequeños, mientras que en las válvulas de globo y de bola el elemento de cierre está en contacto con el asiento, con lo que el rozamiento es más importante.

Servomotor eléctrico

El servomotor eléctrico es un motor eléctrico acoplado al vástago de la válvula a través de un tren de engranajes Fig. 7.11 El motor se caracteriza fundamentalmente por su par y por el tiempo requerido (usualmente 1 minuto) para hacer pasar la válvula de la posición abierta a la cerrada o viceversa. Existen básicamente tres tipos de circuitos eléctricos de control capaces de actuar sobre el motor; todo-nada, flotante y proporcional.

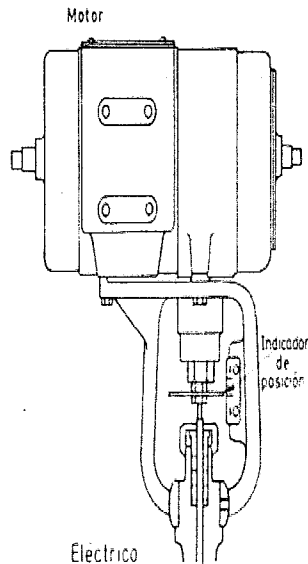


Fig. 7.11

El circuito todo-nada representado en la figura 7.12 consiste en un motor eléctrico unidireccional acoplado en la figura consiste en un motor eléctrico unidireccional acoplado al vástago de la válvula con una leva que fija el principio y el final de la rotación del motor gracias a dos interruptores de final de carrera S_1 y S_2 . Según la posición del elemento de

control (cierre entre los contactos 1-2 o entre 1-3) se excita el devanado de la derecha o el de la izquierda de la figura y el motor gira en uno u otro sentido hasta el final de su carrera.

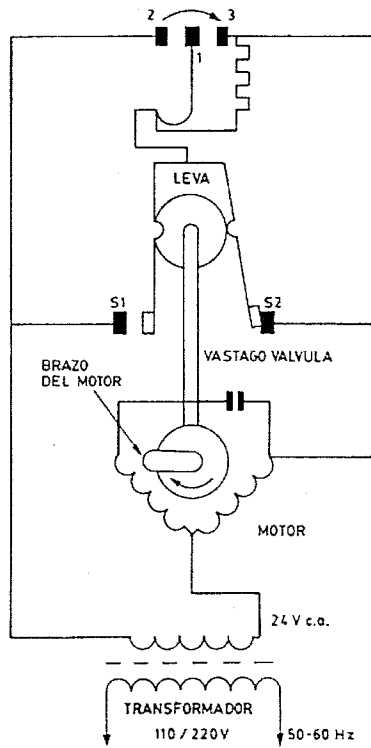


Fig. 7.12

El circuito flotante de la figura 7.13 consiste en un motor eléctrico bidireccional con interruptores de fin de carrera, acoplado al vástago de la válvula. El interruptor del controlador “flota” entre los dos contactos de accionamiento y es de disparo lento. El motor gira a derecha o a izquierda según el controlador cierre el contacto correspondiente y se para si el contacto móvil no toca ninguno de los fijos o bien cuando llega al final de su carrera.

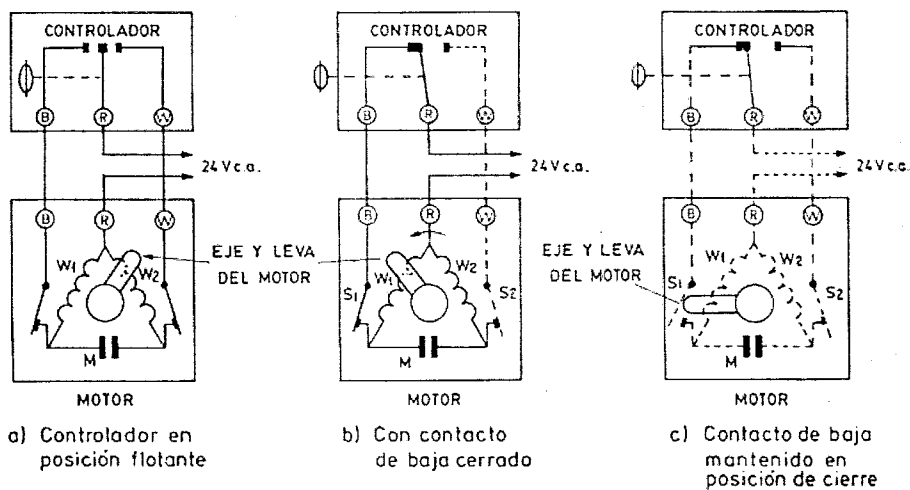


Fig. 7.13

Los servomotores hidráulicos

Consisten en una bomba de accionamiento eléctrico que suministra fluido hidráulico a una servoválvula. La señal del instrumento de control actúa sobre la servoválvula que dirige el fluido hidráulico a los dos lados del pistón actuador hasta conseguir, mediante una retroalimentación, la posición exacta de la válvula. Se caracterizan por ser extremadamente rápidos, potentes y suaves, si bien su coste es elevado, por lo que sólo se emplean cuando los servomotores neumáticos no pueden cumplir con las especificaciones de servicio.

CAPITULO 8

ANALISIS Y MODELADO DE LAZO DE CONTROL SIMPLE DE VARIABLES COMUNES

8.1 CONTROL DE FLUJO

La diferencia fundamental entre los sistemas de control de flujo y los sistemas de control de las demás variables radica en que el proceso de flujo presenta una constante de tiempo casi siempre menor que las constantes de tiempo del resto del sistema (válvula de control elemento primario y transmisor, líneas neumáticas, controlador, etc.)

La forma de la respuesta, en el tiempo o en la frecuencia, del sistema de control estará determinada en mayor grado por las constantes de tiempo de la válvula y del transmisor, más que por la constante de tiempo del proceso en sí.

Tenemos la función

$$F(t) = \bar{F} + f(t) \quad (8.1)$$

Donde

$F(t)$ = flujo total

\bar{F} = Valor nominal del flujo

$f(t)$ = variación del flujo

Entonces

$F(s) = \{f(t)\}$

Análisis del Proceso

No procede aquí el análisis completo de un proceso de flujo, tanto por la naturaleza de este trabajo, como por la enorme complejidad de las ecuaciones resultantes. Por tales motivos se estudiará el caso de flujo de líquidos y adoptaremos para ello un modelo concentrado.

Se usará el newton/dm^2 como unidad de presión, a fin de que las ecuaciones presenten compatibilidad con las unidades físicas empleadas.

Capacitancia

Este parámetro se origina en la compresibilidad del fluido estudiado. Puesto que los líquidos son casi incompresibles, pues suponerse que la capacitancia de una línea que conduce un líquido es despreciable.

Inertancia

El parámetro inertancia esta relacionado con la inercia del líquido a ser acelerado. La inertancia presentada por un líquido en una tubería viene definida por la siguiente ecuación

$$P = I \frac{dF}{dt} \quad (8.2)$$

La inertancia es análoga a la inductancia eléctrica.

La ecuación 8.2 es similar a la ecuación que relaciona la caída de voltaje en un inductor con la corriente que circula por él.

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (8.3)$$

V= Volts; L = inductancia en Henry; i = corriente

Si se aplica la segunda ley de Newton a la masa comprendida en una distancia de L decímetros de tubería, tendremos

$$PA = \frac{M}{10} \frac{d^2v}{dt^2} \quad (8.4)$$

Donde

P = presión aplicada para acelerar la masa; (newton/dm²)

M = masa del líquido = A Lρ; Kilogramos

A = área de la sección del tubo, (decímetros cuadrados)

V = velocidad; (decímetros/seg)

El flujo es el producto del área por la velocidad el fluido; F = Av (litros/seg), de donde la ecuación 8.4 toma la siguiente forma.

$$PA = \frac{\rho L}{10} \cdot \frac{dF}{dt} \quad (8.5)$$

ρ = densidad del líquido; (Kg / dm³)

Sustituyendo la ecuación 8.5 en la 8.2 se obtiene el valor de la inertancia.

$$= \frac{\rho L}{10A}; \text{Newton} - \text{seg}^2/\text{dm}^5 \quad (8.6)$$

Resistencia

Al igual que en redes eléctricas, la resistencia hidráulica está ligada al efecto disipativo de la línea. En virtud de que dicha resistencia está relacionada en forma no lineal con el flujo, es conveniente definir el valor resistivo como la relación entre los incrementos de flujo y los incrementos de la caída de presión por la fricción con las paredes del tubo, esto es:

$$R = \frac{d(\Delta P)}{dF} \quad (8.7)$$

Donde ΔP es la caída de presión por rozamiento.

Para evaluar la ecuación 8.7 es necesario conocer la característica del flujo. Se presentan dos casos;

a) Régimen turbulento

Cuando existe flujo turbulento, caso más común, la caída de presión y el flujo están relacionados por la ecuación de Fanning

$$\Delta P = kF^2 \quad (8.8)$$

Diferenciando la ecuación 8.7 y evaluando para condiciones nominales

$$d(\Delta P) = 2k F dF \quad (8.9)$$

Sustituyendo 8.9 y 8.8 en 8.7

$$R = \frac{2\Delta P}{F} \quad (8.10)$$

R= resistencia en new-seg/dm²

b) Flujo laminar

En este caso la caída de presión y el flujo están relacionados en forma lineal.

$$\Delta P = kF \quad (8.11)$$

Derivando y sustituyendo

$$R = \frac{\Delta P}{F} \quad (8.12)$$

8.2 Control de presión

El control de presión se caracteriza por una gran capacidad, un pequeño atraso de transferencia y un tiempo muerto pequeño. La capacidad incrementada es útil a la autorregulación del proceso. Esta característica permite controladores de tipo proporcional para ser usados en muchos casos.

Los reguladores automáticos de presión son frecuentemente usados en control de presión. Estos dispositivos tienen una banda proporcional fija la cual es suficientemente pequeña, de modo que la ganancia sea grande y consecuentemente el transitorio sea mínimo. Estos controladores tienen bajo costo, alta seguridad y bajo mantenimiento.

El íntimo acoplamiento del proceso directamente al regulador de una respuesta rápida cuando el sistema se desajusta. Debido a que el dispositivo es esencialmente un sistema de resorte antagonico, la presión del control generalmente se mantiene dentro de 10° de la escala total.

El regulador de presión automático se instala directamente sobre la línea y la conexión sensible de control se localiza a 10 diámetros aproximadamente de la unidad figura 8.1

Esta localización elimina presiones erróneas causadas por turbulencias, cambios subidos en velocidad o pérdidas en la línea.

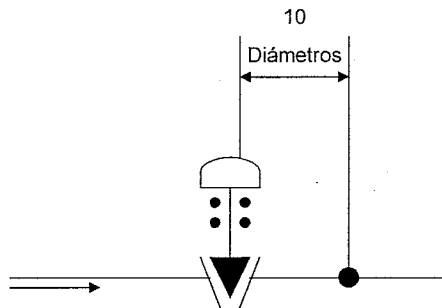


Fig. 8.1

Cuando los reguladores automáticos se usan con líquidos a menudo corren convulsiones o vibraciones, debido a la súbita apertura de la válvula interna contra la relativa incompresibilidad del líquido, que produce un golpe de ariete.

Cuando el regulador está operando con su tapón próximo a su asiento y la velocidad de la línea esta actuando en tal forma que tienda a cerrar, el efecto de Bernoulli tiende a causar el cierre prematuro de la válvula. Cuando el regulador intenta corregir el problema, ocurre un martilleo. Esto frecuentemente es una indicación de que el regulador usado es muy grande para la aplicación.

El regulador de presión automático consiste esencialmente en la mayoría de los casos de una válvula de asiento simple de cierre hermético. Debido a esto falla en la posición de abierta, debido ya sea a que hay baja presión en la línea o a la ruptura del diafragma. Si esta falla e posición no puede ser tolerada, deben ser usados dispositivos operados con pilotos.

Los reguladores de presión automáticos deberán de ser operados aproximadamente a 50% de su carrera completa bajo coediciones normales para obtener mejores resultados y el

mejor desgaste en la válvula. En aquellas aplicaciones en que existe una gran diferencia entre los flujos máximo y normal, pueden usarse dos reguladores en paralelo. La presión de control de un regulador se fija para las condiciones de flujo normal, mientras que la del segundo es fijada aproximadamente un 10% abajo. Cuando la presión de salida del primer regulador "disminuye" debido a una demanda superior a la normal, el segundo regulador entra para aumentar la capacidad de flujo sin perder la presión de control.

Otros dos tipos de controles de presión son el conjunto de transmisor-controlador y válvula y el control de presión operado con piloto. Los controladores de presión operados con piloto utilizan un elemento de medición que actúa sobre un mecanismo de control neumático que produce una señal de aire a presión proporcional a la presión mediana. Las ventajas de estos dos tipos de instalaciones son:

1. Gran sensibilidad
2. Banda proporcional, reajuste y calibración ajustables.
3. Facilidad de ajuste
4. Flexibilidad (por ejemplo, reversibilidad, localización, remota, etc.)
5. Mayor número de ajustes de presión para un rango dado
6. Mayor selección de rangos de presión
7. Puede ser usado con caídas de presión grandes o pequeñas
8. Amplios rangos de flujos
9. Pueden ser usados donde las condiciones de flujo requieren grandes cuerpos de válvulas
10. Las válvulas de control tienen rangos de presión estandarizados
11. La válvula puede hacerse menguar en cualquier dirección

Cuando el sistema tiene una gran capacidad, el modo proporcional es generalmente adecuado para el control. El ajuste de reposición se usa cuando no se puede tolerar desviaciones del punto de control.

8.3 Control de Nivel

El control de nivel es similar al control de presión, generalmente tiene una capacitancia considerable. Algunos sistemas tienen un tiempo muerto considerable, sin embargo, los retrasos de transferencia son pequeños. La capacitancia contribuye a la autorregulación del nivel del líquido en niveles atmosféricos. La autorregulación es pequeña generalmente cuando el nivel está sometido a presión.

La precisión del control de nivel del líquido difiere para varios procesos. Esta característica hace posible tener tres arreglos diferentes de control: 1) límite alto – bajo, 2) nivel medio, 3) nivel preciso.

El control de dos posiciones con abertura diferencial es usado tanto con equipo eléctrico como neumático. Este modo de control es satisfactorio cuando el nivel puede oscilar entre un límite alto y uno bajo sin que se afecten los requisitos del proceso. El nivel se mantiene dentro de la abertura diferencial sin dificultad si la capacitancia es suficientemente grande. Las ventajas de este modo de control son: 1) simplicidad del equipo, 2) economía y 3) ausencia de desgaste de las válvulas. Este modo requiere que la alimentación máxima al

nivel exceda a la descarga máxima con el objeto de asegurar que el recipiente no se vaya a vaciar.

El control de nivel de líquido "medio" es usado donde la presión del control de nivel puede ser sacrificada con el objeto de mantener la descarga del recipiente más o menos constante. Una aplicación típica es aquella donde el recipiente del proceso bajo control es parte de una cadena de procesos y la descarga de uno es la alimentación del otro. Un tanque con control de nivel actúa como tanque amortiguador para absorber cualquier cambio violento de carga. Se le permite al nivel desplazarse gradualmente hacia arriba y hacia abajo.

Se estabiliza en cualquier punto para una banda y no fluctúa solamente entre los límites alto y bajo como en el caso del control conectar-desconectar.

Se ponen topes límite para evitar que el tanque se inunde o se drene antes de que se obtenga la respuesta de control adecuada. Generalmente se necesita un posicionador de válvula debido a que ésta requiere una acción lenta y suave.

El control medio se obtiene con un controlador proporcional con reposición. La banda proporcional puede ser tan alta como 400% con el objeto de hacer el sistema poco sensible. El tiempo de reposición es corto, lo que resulta en un intento inmediato para corregir el error del nivel. Sin embargo, debido a que la banda proporcional es grande, la cantidad de corrección debida a la reposición es pequeña. Su persistencia conforme el tiempo pasa, causa una pequeña corrección sostenida, resultando un sistema sobreamortiguado.

En muchos procesos es necesario el control exacto. El control de banda proporcional con frecuencia proporciona un nivel lo suficientemente cercano al deseado con muy pequeños disturbios. Si el tanque es parte de una serie de procesos, este modo impide desajustes de caga severos a cambio de pequeños sacrificios en el nivel. Varios controladores, del tipo del flotador conectado directamente, son usados con modos proporcionales iguales a una fracción pequeña de la carrera del flotador. Con estos dispositivos la banda proporcional es tan pequeña como 3/16 plg fuera del nivel. Sin embargo, si hay gran capacitancia en el nivel, esta banda es adecuada para la modulación de la válvula y para un control razonable y exacto. Las ventajas de este equipo son simplicidad y economía. Los controladores operados por flotador con frecuencia se usan en tanques de purga Figura 8.2

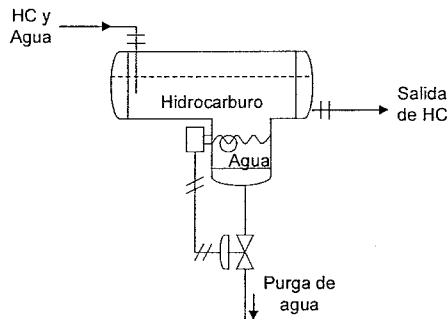


Fig. 8.2

El modo proporcional con reposición es usado cuando existe una capacidad pequeña del proceso y hay un atraso de transferencia debida a capacidades múltiples. Esto trae consigo un control exacto y preciso bajo cualquier condición.

En muchos casos la presión interior del indicador de nivel es considerablemente mayor que la presión sola desarrollada por el nivel del líquido. Una fluctuación severa en la presión de operación puede hacer que el flujo de descarga varíe considerablemente. Como resultado, se ve afectado el nivel del líquido. La autorregulación en estas condiciones no existe.

Con el objeto de compensar este problema, se usa e control en cascada con el controlador de flujo utilizado como control secundario figura 8.3. Conforme el flujo cambia debido a cambios en la presión, el controlador secundario inmediatamente corrige el flujo antes de que el nivel de líquido cambie apreciablemente. Para tener un control exacto, ambos controladores deberán tener un modo proporcional con reposición.

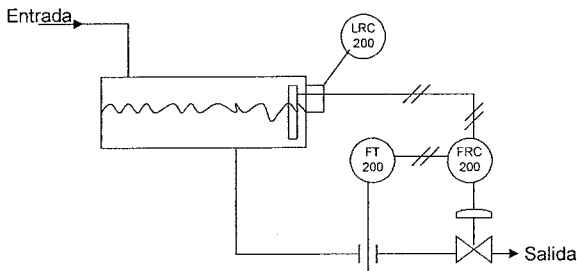


Fig. 8.3

8.4 Control de temperatura

Cada problema de control de temperatura básicamente es una regulación de intercambio de calor. Debido a la naturaleza de la transferencia de calor, los procesos de temperatura se caracterizan por capacidades mayores que en casos de flujos, presiones o niveles de líquidos. La velocidad de la reacción del proceso también es lenta. El tiempo muerto es frecuentemente grande, particularmente en procesos de calentamiento de fluidos tales como calentadores de carga y columnas de destilación. Algunos procesos, como el de un horno de tratamiento térmico, tienen pequeños atrasos de transferencia y tiempos muertos.

El atraso de temperatura involucrado en la medición de esta variable es un factor muy importante. El elemento térmico generalmente se coloca en un pozo para protegerlo y permitir darle mantenimiento sin interrumpir el proceso.

La velocidad de respuesta del elemento de temperatura depende de su diseño, del material del pozo y la velocidad del fluido en el que está insertado. El elemento no debe ser colocado en lugar estanco o en lugares donde se tengan bajas velocidades de flujo

Los procesos de gran capacidad y pequeños retrasos de transferencia y tiempo muerto, son adecuados para control conectar-desconectar. Los hornos y baños de control de temperaturas caen dentro de esta clasificación. Este modo puede ser usado para la mayoría de los hornos eléctricos, la mayoría de los hornos de tubos radiantes y hornos de flama abierta donde las presiones del horno y la relación aire-combustible no son controladas y en donde los productos de la combustión no son usados como atmósfera protectora. El control

conectar- desconectar con un entrehierro diferencial puede generalmente controlar dentro de 1%.

El horno de varias posiciones es con frecuencia usado en hornos de tipo de baño. Dichos hornos requieren una energía de entrada elevada para conseguir un calentamiento rápido, pero energía considerablemente menor cuando la carga alcanza su temperatura. Este refinamiento al control de disposiciones incluye tres posiciones: alto, bajo y fuera. El control fluctuar entre bajo y fuera una vez que el proceso haya alcanzado su temperatura.

El control flotante se usa donde los cambios de carga son lentos y la velocidad de reacción del proceso están entre lenta a moderada. Los atrasos de transferencia y de medición deben ser mínimos. Con frecuencia se usa para controlar el flujo de aire en la sección de enfriamiento de los hornos continuos de baja velocidad.

El modo proporcional se usa cuando se desea un control más preciso. También proporciona un flujo continuo de potencia o calor, como en los gradientes de calentamiento de tiras continuas o filamentos y calentamientos por medio de aire o gases no recirculantes. En estas aplicaciones, la reacción es tan rápida que el control de dos posiciones puede producir grandes oscilaciones de temperatura. El control proporcional se hace necesario en hornos que queman combustible, en los cuales se controle la relación are-combustible o la presión del hogar o en donde se usen los productos de la combustión como atmósfera protectora.

Se usa el control proporcional cuando los cambios de carga o las mediciones del atraso de tiempo son grandes. Para grandes cambios de carga, la banda proporcional debe ser pequeña con el objeto de evitar trastornos. Cuando la medición de los atrasos de tiempo es grande, la banda proporcional puede hacerse bastante más amplia para asegurar un control en línea recta. La velocidad de reacción no es crítica con este modo.

En cualquier problema de temperatura, la capacidad en el lado de carga deberá ser mayor que en el lado de suministro. Una gran capacidad en el lado de carga es favorable, ya que ella disminuye y suaviza las variaciones. Por esta razón, equipos tales como intercambiadores de calor deberán ser llevados a plena carga para evitar que ciclen cuando están bajo control proporcional.

Cuando la diferencia de temperatura entre el suministro y la carga es grande, cantidad de calor potencialmente transferible es grande y un control conectar-desconectar trae consigo ciclaje de gran amplitud. Con modo proporcional, el control se obtiene solamente por medio de un control con banda muy amplia. Una diferencia de temperatura pequeña ayuda a obtener un buen control.

El modo proporcional más reajuste es usado donde hay un atraso de tiempo apreciable en detectar la temperatura y donde hay grandes y frecuentes cambios de carga. Esta condición existe en procesos continuos, tales como intercambiadores de calor y hogares continuos.

El modo estimativo es usado para sobrellevar atrasos de transferencia en procesos de temperatura. Algunos transmisores son construidos con la característica de relación con el objeto de sobrellevar el problema del atraso de la medición de la temperatura. La acción estimativa combinada con el modo proporcional más reposición es muy deseable en la mayoría de los controles de temperatura que involucran atrasos dinámicos muy largos.

La localización del elemento de temperatura frecuentemente influye tanto sobre la eficiencia del control, como las otras partes del circuito de control.

El bulbo de temperatura deberá siempre localizarse en un punto donde el coeficiente de transferencia de calor sea tan grande como sea posible. En columnas fraccionadotes, el vapor que deja un líquido en ebullición estará a la temperatura del líquido. Sin embargo, el

elemento deberá localizarse dentro del líquido sobre la placa de columna y no en el espacio de vapor entre las placas para aprovechar el alto coeficiente del líquido.

En el caso de un evaporador en el cual el líquido tiene un aumento del punto de ebullición, el vapor será sobrecalentado, produciendo una capa de gas que rodea cualquier bulbo colocado en el espacio de vapor. Aquí nuevamente el bulbo deberá ser localizado dentro del líquido.

Con objeto de conseguir un buen control de temperatura, el flujo del proceso deberá ser constante aun cuando la temperatura cambie. Algunas veces algún control de presión o de presión diferencial estabilizará los suministros de flujos. En muchos sistemas de destilación y de fraccionado, el control de temperatura se pone en cascada sobre el control de flujo. El controlador de flujo inmediatamente corrige todas las desviaciones en el flujo hacia o proveniente de la unidad, mientras que el control de temperatura hace más lentamente los ajustes graduales en el flujo que sean necesarios para compensar el cambio de calidad de la alimentación o composición del combustible.

8.5 Control de composición

Los procesos normalmente se controlan a través de variables químicas y físicas que produce el producto. Los ajustes en los controles son hechos como resultado del análisis de laboratorio del producto. Existen analizadores de composición del flujo que analizan automáticamente el producto y mandan una señal directamente al elemento de control final. Este control "terminal" ha tenido muchas aplicaciones con el desarrollo de la cromatografía, análisis de infrarrojos, análisis de semiinfrarrojos, análisis de ultravioleta, espectrometría de masa y refractometría.

La cromatografía es útil en la determinación del porcentaje de un producto dado en el chorro de un flujo. Tiene un alto grado de sencillez de operación y es completamente sensible. Su respuesta a un análisis simple (como de sopentano de butano) requiere 4 a 5 min., empeoran sido desarrolladas unidades de alta velocidad para hacer análisis en menos de 1 min. Esta característica del instrumento resulta en una cierta cantidad de tiempo muerto, lo que no es serio generalmente en el tipo de problema de control al que se aplica. Los fraccionadores y absorbedores pueden ponerse en control de "punto terminal" usando equipo de cromatografía. En general, este puede usarse en cualquier operación donde el control de temperatura se esté usando como método de control de composición.

CAPITULO 9

APLICACIONES

9.1 Controladores programables

Un controlador lógico programable (PLC) es un sistema de control industrial basado en una computadora que usa instrucciones de programación para tomar decisiones de encendido y apagado que de otra manera tendrían que ser realizadas por lógicas alambradas con relevadores o compuertas lógicas.

Un PLC puede dividirse mentalmente en partes: 1) Sección E/S, 2) procesador, y 3) dispositivo de programación.

La sección de E/S de un controlador lógico programable se encarga del trabajo de intercomunicación entre los dispositivos industriales y los circuitos electrónicos de baja potencia que almacenan y ejecutan el programa de control. El programa de control será llamado por nosotros el programa de usuario.

La sección de E/S proporciona la interfaz para traer señales de entrada de 120-V de ca al procesador tipo computadora (entrada) y para convertir señales de procesador de bajo voltaje a señales industriales de 120-V de ca (salida).

El procesador almacena y ejecuta el programa de usuario, que es la secuencia de instrucciones que el usuario ha creado para controlar la máquina o proceso industrial.

Las condiciones de entrada se almacenan en el archivo de imágenes de entrada, que es una parte de la memoria del procesador. Esto es, cada terminal del modulo de entrada de la sección de E/S tiene asignado un lugar determinado dentro del archivo de imágenes de entrada.

Las condiciones de salida se almacenan en el archivo de imágenes de salida, que es otra parte de la memoria del procesador.

Cada terminal de salida tiene asignada una localidad de memoria en el archivo de imágenes de salida. Esa localidad en articular está dedicada exclusivamente a la tarea de llevar el registro de la última condición de su terminal de salida.

El dispositivo de programación es el dispositivo equipado con teclado a través del cual el usuario ingresa o edita el programa a ser ejecutado por el procesador.

Un procesador de un PLC puede ser visualizado como una unidad de procesamiento central (CPU) y cuatro secciones de memoria: 1) archivo de imágenes de entrada, 2) archivo de imágenes de salida, 3) memoria del programa de usuario y 4) memoria de datos variables. La mayoría de los PLC presentan su programa en una pantalla de CRT, o papel, en un formato de lógica en escalera, que es como un diagrama esquemático de lógica en escaleras con relevadores.

9.2 Control distribuido

En los años sesenta, dentro de los esfuerzos de investigación dedicados a la resolución del problema de 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:

1. Descartar el empleo de un único ordenador (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 debería 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. (De este modo, un solo controlador digital podía efectuar un control P, PI o PID, o de relación, o en cascada,...)
3. La velocidad en la adquisición de los datos y su salida hacia las válvulas de control debía ser en “tiempo real”, lo que obligaba a utilizar microprocesadores de 16 bits (que en los años setenta eran comercialmente una novedad).
4. Para comunicar entre sí los transistores eléctricos de campo, los controles 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 una 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 cualquiera 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 y el control clásico puede compararse a la existencia entre el primer ordenador, el ENIAC, que se configuraba cambiando cable, y el actual ordenador personal donde los cables existen “electrónicamente” configurados por el programa escrito (software) que se ejecuta.

El ordenador personal también se ha incorporado al control distribuido. Permite la visualización de las señales 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 controlador básico del sistema es un microprocesador que proporciona los clásicos controles PID y otros algoritmos de control. Es apto para el manejo de 8 lazos que proporciona, entre otros, los siguientes algoritmos de control:

Salida manual

PID normal

PID con ajuste externo del punto de consigna

PID con control anticipativo (feedforward)

Adelanto-retardo

Sumador
Multiplicador-Divisor
Relación
Extracción de raíz cuadrada
Rampas programadas (temperatura en procesos discontinuos)
Contador

Estos algoritmos pueden configurarse definiéndose de este modo, el último modo de control a retener en caso de avería, las unidades de ingeniería (tipo de termopar, termo resistencia,...), la acción de control (directa, inversa), el tipo de señal de entrada (lineal, raíz cuadrada,...), las alarmas, etc.

El controlador multifunción que, al utilizar en su programación un lenguaje de alto nivel, se asemeja a un ordenador personal, proporciona las funciones de control lógico que permiten regular un proceso discontinuo (batch control), y el manejo de procesos complejos, en los que el controlador básico está limitado. Tal es el caso del control de una columna de destilación, donde el control es dinámico, y es necesario realizar cálculos en "tiempo real" sobre las ecuaciones de equilibrio entre el reflujo interno y el reflujo externo en cabeza de la columna.

Otros casos típicos son la manipulación de reactores en condiciones normales, el precalentamiento de líquidos de alimentación de procesos mediante la creación, matemática de modelos, etc.

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, caso de que se produzca. 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, 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 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% de tiempo, mientras que el 10% restante está en reparación. Pues bien, en los sistemas de control distribuido, la disponibilidad típica varía desde 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.

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.

9.3 Análisis de sistemas típicos de instrumentación y control

Se pretende presentar aplicaciones de los instrumentos en los procesos industriales

Las calderas de vapor se utilizan en la mayoría de industrias debido a que muchos procesos emplean grandes cantidades de vapor. La caldera se caracteriza por una capacidad nominadle producción de vapor en t/h a una presión especificada y con una capacidad adicional de caudal en puntas de consumo de la fábrica.

A la caldera se le exige, pues, mantener una presión de trabajo constante para la gran diversidad de caudales de consumo en la factoría, por lo cual debe ser capaz de:

- a) aportar una energía calorífica suficiente en la combustión del fuel – oil o del gas con el aire;
- b) desde el punto de vista de seguridad, el nivel debe estar controlado y mantenido dentro de unos límites;
- c) es necesario garantizar una llama segura en la combustión;
- d) el sistema de control debe ser seguro en la puesta en marcha, en la operación y en el paro de la caldera.
- e) El funcionamiento de la caldera debe ser optimizado para lograr una rentabilidad y economía adecuada, lo cual es posible con un control digital y /o distribuido que permite optimizar la combustión (ahorros de 2 a 10% en combustible) y ganar en seguridad

La regulación de la combustión base en mantener constante la presión de vapor en la caldera, tomándose sus variaciones como una medida de la diferencia entre el calor tomado de la caldera como vapor y el vapor suministrado.

El controlador de la presión de vapor ajusta la válvula de control de combustible. La señal procedente del caudal de aire es modificada por un relé de relación para ajustar la relación entre el aire y el combustible, y pasa a un controlador que la compara con la señal de caudal de combustible. Si la proporción no es correcta, se emite una señal al servomotor de mando del ventilador o a la válvula de mariposa, de modo que el caudal de aire es ajustado hasta que la relación combustible-aire es correcta.

Secaderos y evaporadores.

Los secaderos tienen por objeto obtener el producto sólido con poca humedad, mientras que los evaporadores concentran el producto en forma líquida al evaporar el agua.

Entre los diversos modelos de secaderos se encuentra el secadero continuo de evaporación rápida que transporta el producto en una corriente de aire caliente y en muy poco tiempo disminuye su humedad hasta el valor final. Como es difícil medir directamente la humedad del producto en forma continua se controla en su lugar la temperatura variable que depende indirectamente de la humedad.

El control suele ser cascada, siendo la variable primaria la temperatura de salida y la variable secundaria la temperatura después del horno. El control es normalmente PID.

Otro tipo de secador es el rotativo, que consiste en un cilindro de gran longitud en cuya entrada se introduce el producto húmedo y a través del cual circula aire caliente.

El control debe ser en cascada PID.

Horno túnel

Los instrumentos de regulación y control forman parte integral de los equipos de procesos de la industria y en particular constituyen una necesidad en el proceso de cocción de los productos cerámicos realizado en un horno túnel.

La zona de cocción puede dividirse en varias zonas de control y cada una suele estar regulada independientemente por un regulador todo – nada, o flotante, o bien por un regulador proporcional o proporcional + integral o proporcional + integral + derivativo.

Columnas de destilación.

La operación de destilación consiste en separar una mezcla por diferencia de composición entre un líquido y su vapor. Esta operación se realiza en forma continua en las denominadas columnas o torres de destilación donde por un lado asciende el valor del líquido hasta salir por la cabeza de la columna y por el otro va descendiendo el líquido hasta llegar a la base. En estos pasos tiene lugar una mezcla entre las dos fases, de tal modo que pueden efectuarse extracciones a distintos niveles de la columna para obtener productos más o menos pesados.

La presión en la columna se regula mediante un controlador de presión en cascada con un controlador de caudal de los gases incondensables que escapan del condensador.

El caudal de alimentación se regula con un controlador de caudal que mantiene un caudal constante gracias a una banda proporcional bastante estrecha “alta ganancia”.

9.4 Selección de los elementos que constituyen un sistema típico de instrumentación y control.

Las cuatro componentes básicas de un sistema de control pueden ser consideradas las siguientes: (1) el proceso, (2) transmisor, (3) controlador y (4) el elemento final de control. La figura 9.1 ilustra un circuito de un intercambiador de calor como un sistema de control automático típico en relación con la definición de las componentes básicas.

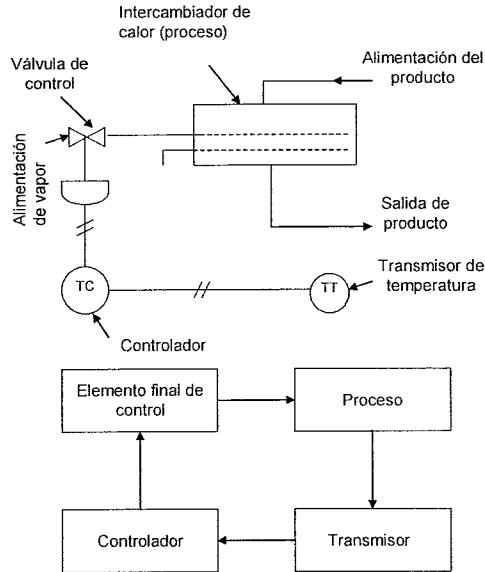


Fig. 9.1

1. Sección de proceso

Proceso. Las funciones colectivas desarrolladas en y por el equipo en el cual va a ser controlada la variable. El equipo no incluye ningún equipo de control.

Sistema de control automático. Cualquier combinación operable de uno o más controladores automáticos conectados en circuitos cerrados con uno o más procesos.

Variable controlada. La cantidad o condición que es medida y controlada (flujo, temperatura, presión, etc).

Medio controlado. La energía o material de proceso en el cual se controla una variable.

Variable manipulada. La cantidad o condición que es efectuada por el controlador automático en tal forma que afecte el valor de la variable controlada.

Agente de control. La energía o material del proceso del cual la variable manipulada es una condición o característica.

2. Sección del transmisor

Elemento primario. La porción del sistema de medición que es el primero en utilizar o transformar energía del medio controlado para producir un efecto de respuesta a un cambio de valor en la variable controlada. Este efecto puede ser un cambio de presión, fuerza, posición, potencial eléctrico o resistencia.

Variable medida. Una señal que es una medida de la variable del proceso, generalmente la salida de un instrumento o transmisor de medición.

Transmisor. Un dispositivo para transmitir la señal desde el elemento primario de medición a otro punto.

3. Sección del controlador

Controlador. Un dispositivo que produce una señal de control en respuesta a una señal de error de entrada.

Controlador autooperado. Un controlador en el cual toda la energía para operar el elemento final de control se deriva del medio de control a través del elemento primario.

Controlador operado por medio de un relevador. La energía transmitida desde el elemento primario al controlador puede ser reforzada o amplificada para operar el elemento final de control, empleando energía de otra fuente. La mayoría de los controladores son operados por medio de potencia externa debido a que ofrecen mayor flexibilidad. La potencia más común es la eléctrica, la debida a la presión del aire y la hidráulica.

Punto de ajuste fijo. El valor deseado de la variable del proceso.

Error. La diferencia entre el valor del punto de ajuste fijo y la variable medida.

Punto de control. El valor de la variable controlada que el control automático trata de mantener bajo cualquier conjunto de condiciones fijas. En algunos tipos de controladores automáticos (diferencial de dos posiciones o flotante con acción de zona neutra en el controlador), el punto de control toma varios valores y no un valor único de la variable controlada. En el control ideal o completo, el punto de control y el punto de ajuste fijo coinciden.

Modo de control. La relación entre la salida del controlador y el error de entrada.

4. Sección elemento de control final

Elemento de control final. Un dispositivo que puede ser impulsado por la señal de salida del controlador para regular el flujo de energía o material para un proceso (válvula de control, interruptores, reostatos, impulsores de bombas de velocidad variable y compuertas).

Posicionador de válvula. Un dispositivo que compara la posición mecánica de la válvula o elemento final de control con el valor solicitado por la señal de salida del controlador. Se aplica al actuador del elemento de control final una ampliación apropiada de la señal del controlador en proporción a la desviación entre la posición y el valor deseado.

BIBLIOGRAFÍA

- Katsuhiko Ogata
Ingeniería de control moderna
2ª Edición
Ed. Prentice-Hall Hispanoamericana S.A.
México, 1993

- Saucedo Flores Salvador, Rodríguez García José Luis
Apuntes de control automático de procesos
Ed. IPN, Dirección de publicaciones
México, 1985

- Weyrick Robert
Introducción al control automático
Ed. Gustavo Gill S.A.
Barcelona, 1977

- Buffa Elwood
Administración y dirección técnica de la producción
7ª Edición
Ed. Limusa
México, 1991

- Vaughn Richard
Introducción a la ingeniería industrial
Ed. Reverté S.A.
2ª Edición
Mexico 2000

- Instrumentación industrial
Creus Solé Antonio
Ed. Alfa Omega
5ª Edición
México 1993