



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MEXICO



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.



"ANÁLISIS Y DESARROLLO DEL TABLERO DE CONTROL Y LOS PROTOCOLOS DE ARRANQUE Y OPERACIÓN DEL SISTEMA DE TANQUES."

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

IGNACIO CHRISTIAN GÓMEZ RIVAS

ASESOR: M. en E. EDUARDO VÁZQUEZ ZAMORA



México, D.F., Enero del 2014

AGRADECIMIENTOS.

EN PRIMER LUGAR, AGRADECER A LA VIDA QUE ME PERMITE CONCLUIR ESTA OTRA ETAPA DE LA VIDA.

AGRADECER EL APOYO DE LA FAMILIA.

ADEMÁS, EL QUE TENGA UNO SALUD PARA CONTINUAR.

AL PROFESOR EDUARDO VÁZQUEZ POR SER MI DIRECTOR DE TESIS.

AL DESTINO, PORQUE ME HA PERMITIDO APRENDER MUCHO MÁS QUE LO QUE UNO CONTEMPLA INICIALMENTE.

A LOS PROFESORES QUE HE TENIDO A LO LARGO DE LA VIDA, PORQUE DE TODOS ELLOS APRENDE UNO.

ASIMISMO, A LA GENTE QUE VA CONOCIENDO UNO A LO LARGO DE LA VIDA, PORQUE LE DEJAN A UNO ENSEÑANZAS IMPORTANTES Y VALIOSAS.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.

NOMENCLATURA.

RESUMEN. _____ 7

INTRODUCCIÓN. _____ 8

1. CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS DE DINÁMICA Y CONTROL DE PROCESOS. _____ 12

1.1. DEFINICIÓN DE LOS CONCEPTOS INVOLUCRADOS EN LA DINÁMICA

Y CONTROL DE PROCESOS QUÍMICOS. _____ 13

1.1.1. CONCEPTO DEL CONTROL POR RETROALIMENTACIÓN. _____ 16

1.1.2. ESTRUCTURA DEL CONTROL POR RETROALIMENTACIÓN. _____ 17

1.1.3. OTROS TIPOS DE CONTROL. _____ 20

1.1.4. DEFINICIÓN DE SISTEMA. _____ 23

1.2. LA INSTRUMENTACIÓN. _____ 26

1.3. SISTEMA DE MEDIDA. _____ 30

1.4. FORMAS DE INSTRUMENTAR. _____ 34

1.5. CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS. _____ 35

1.6. ERRORES: EXACTITUD, VERACIDAD Y PRECISIÓN. _____ 40

1.7. CALIBRACIÓN. _____ 41

1.8. CONTROLADORES. _____ 42

1.8.1 CONTROLADOR PROPORCIONAL. _____ 42

1.8.2 CONTROLADOR INTEGRAL. _____ 46

1.8.3 CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL. _____ 48

1.8.4 CONTROLADOR PROPORCIONAL DERIVATIVO. _____ 50

1.8.5 CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO. _____ 51

CAPÍTULO 2. ARREGLOS HECHOS EN EL SISTEMA DE TANQUES. _____ 54

2.1 CAPACITIVO PURO. _____ 55

2.2 RETRASO LINEAL.	58
2.3 TANQUES INTERACTUANTES Y NO INTERACTUANTES.	63
CAPÍTULO 3. PROTOCOLOS PARA EL SISTEMA DE TANQUES.	66
3.1 PROTOCOLO A. ANÁLISIS DE LOS TANQUES EN CAPACITIVO PURO.	67
3.2 PROTOCOLO B. ANÁLISIS DE LOS TANQUES CON RETRASO LINEAL.	68
3.3 PROTOCOLO C. ANÁLISIS PARA TANQUES INTERACTUANTES Y NO INTERACTUANTES.	69
CONCLUSIONES.	70
BIBLIOGRAFÍA.	71
ANEXO. DIAGRAMA DE ALAMBRADO PARA TABLERO DE CONTROL.	72

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. DINÁMICA DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA.	14
FIGURA 1.2. CONTROL DE LAZO ABIERTO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA.	17
FIGURA 1.3. CONTROL MANUAL Y AUTOMÁTICO DEL NIVEL DEL AGUA EN EL TANQUE.	18
FIGURA 1.4. ESTRUCTURA TÍPICA DE CONTROL.	20
FIGURA 1.5. CONTROL CONTINUO DEL NIVEL DEL TANQUE.	23
FIGURA 1.6. DIAGRAMA DE BLOQUES (FLUJOGRAMA) DE LAS ETAPAS DE UN ESTUDIO DINÁMICO.	24
FIGURA 1.7. TIPOS DE VARIABLES. REPRESENTACIÓN DE: A) UNA VARIABLE ANALÓGICA Y B) UNA VARIABLE DIGITAL BINARIA.	27
FIGURA 1.8. SEÑALES QUE GUARDAN INFORMACIÓN ACERCA DE VARIABLES.	28
FIGURA 1.9. RUIDO EN UNA SEÑAL.	30
FIGURA 1.10. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE MEDIDA EN EL CONTEXTO DEL CONTROL DE PROCESOS.	30
FIGURA 1.11. OBJETO DE UN SISTEMA DE MEDIDA.	31
FIGURA 1.12. FUNCIONES PRINCIPALES DE UN SISTEMA DE MEDIDA ELECTRÓNICO.	32
FIGURA 1.13. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE MEDIDA.	32
FIGURA 1.14. SISTEMA DE MEDIDA MULTICANAL CON UN SOLO ADC.	33
FIGURA 1.15. SISTEMA DE MEDIDA MULTICANAL CON UN ADC POR CANAL.	33
FIGURA 1.16. ARQUITECTURA CENTRALIZADA.	36
FIGURA 1.17. ARQUITECTURA DISTRIBUIDA.	36
FIGURA 1.18. EJEMPLOS DE CURVA DE CALIBRACIÓN. A) CURVA DE CALIBRACIÓN LINEAL. B) CURVA DE CALIBRACIÓN NO LINEAL.	36
FIGURA 1.19. PARAMETROS PERTENECIENTES A LA CURVA DE CALIBRACIÓN.	38
FIGURA 1.20. COMPARACIÓN DE DOS FORMAS DE APROXIMAR A LA CURVA DE CALIBRACIÓN.	38
FIGURA 1.21. DEFINICIÓN DE ZONA MUERTA.	39
FIGURA 1.22. DEFINICIÓN DE HISTÉRESIS.	40
FIGURA 1.23. DEFINICIÓN DE DERIVA.	40
FIGURA 1.24. DEFINICIÓN DE RESOLUCIÓN.	41
FIGURA 1.25. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA BANDA PROPORCIONAL.	44
FIGURA 1.26. REAJUSTE MANUAL PARA COMPENSAR UN CAMBIO DE CARGA.	45
FIGURA 2.1. ELEMENTO CAPACIDAD PURA.	55
FIGURA 2.2. NIVEL EN TANQUE CON RESTRICCIÓN DE SALIDA CONSTANTE.	58
FIGURA 2.3. LINEALIZACIÓN DE LA FUNCIÓN CAUDAL. CAMBIO DE COORDENADAS.	60
FIGURA 2.4. RETRASO LINEAL.	62
FIGURA 2.5. TANQUES DE ALMACENAMIENTO EN SERIE.	63
FIGURA 2.6. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE LÍQUIDOS.	65

NOMENCLATURA.

P : Presión.

δ : densidad

Qe: Caudal de entrada.

Qs: Caudal de salida.

h: Nivel del Tanque.

g: Aceleración de la gravedad.

V: Volumen.

T: tiempo muerto.

LC: Controlador de nivel.

ADC: Convertidor analógico digital.

DAC: Convertidor digital analógico.

E, e: Error.

BP. Banda proporcional.

A: Área de sección transversal del tanque.

R: resistencia.

Para ahondar más, revisar las que existen en cada Capítulo.

RESUMEN.

La Ingeniería Química es una profesión que desde sus inicios ha estado en constante cambio motivado por la incesante actividad humana y que como tal todavía tiene mucho que cambiar y al mismo tiempo aportar al conocimiento humano, ya que conforme se van desvelando nuevos datos y nuevos conocimientos, se van abriendo así nuevas interrogantes, tan es así que en los círculos que podrían denominarse de elite, sean estos académicos, políticos o empresariales, se comienzan a visualizar palabras, tendencias, teorías o pensamientos que hace apenas pocos años ni siquiera se hubieran imaginado, como el aumento en la edad de jubilación de los trabajadores, la eliminación de la tarjeta de nómina, el advenimiento de la computación cuántica, o que los estudiantes universitarios dejen de depender de las aportaciones del Estado para llevar a cabo su formación.

Así, es deseable que los actuales estudiantes de Ingeniería adquieran las nuevas herramientas con las cuales puedan desenvolverse en su área de interés. También, todas las ramas de la Ingeniería se van actualizando con el fin de mejorar en sus procesos, y así, el alumno debe irse adecuando a lo nuevo que rige.

Con el fin de apoyar en el proceso de enseñanza-aprendizaje que debe darse dentro de los salones de clase se desarrolla esta tesis, la cual elabora un Tablero de Control y Tres Protocolos para que sean seguidos por los alumnos de la Materia de Dinámica y Control de Procesos que se imparte dentro del Plan de Estudios de la carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Estudios Superiores “Zaragoza” perteneciente a la Universidad Nacional Autónoma de México.

Con este apoyo se busca que los alumnos visualicen mejor los conceptos vistos dentro del Salón de Clases mejorando con esto su comprensión y así obtengan un mejor desempeño tanto académico como laboral. El Tablero tomó como base el arreglo de Tanques elaborado por García Robledo (ver Bibliografía), en donde los sistemas a trabajar son el Capacitivo Puro, el Retraso Lineal y los denominados Tanques Interactuantes. El Tablero está elaborado para trabajar ya sea de manera manual o automática.

INTRODUCCIÓN.

Actualmente muchos de los temas y conceptos vistos dentro de los salones de clase no son comprendidos con la debida amplitud con la que debieran entenderse por los alumnos que cursan las materias. Por otro lado, un gran porcentaje de los alumnos inscritos en Ingeniería Química pocas veces tienen la oportunidad de conocer el trabajo dentro del cual habrán de desenvolverse en su vida laboral, ya sea porque el tiempo dentro de la escuela les deja poco espacio para involucrarse en el área laboral dentro de su área elegida, porque ya tienen compromisos establecidos como personas o contribuyen al sostén del hogar en donde habitan.

Al ser la Ingeniería Química una profesión cuyo aspecto teórico está estrechamente ligado con su parte funcional, se ha pensado tener un prototipo que simule lo más cercano posible a la realidad lo que ocurre en un proceso productivo (podría ser cualquier proceso productivo), claro está, llevando a cabo protocolos que puedan aplicar los alumnos de una manera sencilla y clara, que les dé una visión de la gran amplitud de procesos existentes en la vida real, el cual les ayude a reafirmar los conceptos tratados en la materia de dinámica y control de procesos perteneciente al Plan de estudios de la Carrera de Ingeniería Química impartida en FES-Zaragoza.

También, la Ingeniería Química es una profesión en constante evolución, en donde los conocimientos actuales que se tienen acerca de esta profesión indudablemente habrán de cambiar en los próximos años motivados principalmente por los avances técnicos y científicos que se den en todas las ramas del conocimiento, por el descubrimiento de nuevas ideas que vienen a cambiar la concepción que se tiene del mundo actual.

Al ser una disciplina que se involucra con otras, de estas se nutre y al mismo tiempo aporta conocimiento para otras. También, todas las ramas que componen a esta disciplina se van actualizando conforme el conocimiento humano avanza motivado por las nuevas reglas que se van demandando, ya que estamos empezando a ver

sucesos que hasta ahora no se habían presentado en la historia de la humanidad, como el calentamiento global, el cual ya derritió el glaciar del Volcán Popocatépetl.

Así, se desconocen las consecuencias, buenas o malas, que esto traerá, llámense económicas, políticas o sociales. De este ejemplo, se podrá dar una idea de que las generaciones actuales habrán de resolver problemas medioambientalistas. Así, el Ingeniero Químico se apoya en el conocimiento aprendido dentro del salón de clases que le permitirá un mejor desempeño al llegar a una empresa, donde estas compiten por ofrecer mejores precios y procuran gastar menos en sus insumos, maximizando así, la rentabilidad y, al mismo tiempo, se está comenzando a dar una mayor importancia a los aspectos relativos al cuidado del medio ambiente dentro de las organizaciones. Aquellas empresas que simplemente no satisfacen las demandas de sus clientes simplemente desaparecen.

Al ser la Dinámica y Control de Procesos parte formativa de un Ingeniero Químico, se procura que el alumno adquiera las bases de lo que es la materia, la cual no es ajena a los cambios que se viven diariamente. Así, en esta tesis se elabora un tablero de control para un sistema de tanques en donde los alumnos llevan a cabo tres protocolos pretendiendo que analicen los conceptos vistos dentro del salón de clases. Los arreglos manejados son el Capacitivo Puro, el Retraso Lineal y los Tanques Interactuantes. Estos arreglos se pueden manejar de dos formas: manual o automática. Para cada protocolo el alumno pone a trabajar las bombas y válvulas necesarias para el arreglo determinado, visualiza las variables que tienen que ver con la Dinámica y Control de Procesos: Sistema, Restricción a la Salida del Tanque, Integral de acumulación, Sistemas Interactuantes, Sistema de control a lazo cerrado, a lazo abierto, Importancia de la Transformada de Laplace en Sistemas no Lineales, Variable controlada, Variable manipulable, Agente de control, Medio de Control, poner a trabajar el Sistema de manera automática, programar el controlador, punto de consigna, calibración, error dinámico, error estático, sensibilidad del elemento primario de medición, Valor medido, de qué manera trabaja un controlador PID sobre el elemento final de control, estructura de control, Disturbio –o Perturbación-, Desviación, etc.

El objetivo al llevar a cabo esta tesis es que los alumnos tengan una herramienta más que les permita tener un mejor aprovechamiento escolar y un desempeño laboral destacado. Inclusive, sí se llegará a optar por realizar estudios posteriores, que esto sirva como una experiencia de tomar en cuenta la cuál indiscutiblemente con el paso del tiempo, habría de ser rediseñada.

Se habrían de cumplir los siguientes

OBJETIVOS.

A) GENERALES.

A.1 El desarrollo del tablero de control para el prototipo instalado en Fes-Zaragoza.

A.2 Elaborar los protocolos de arranque y operación del sistema de tanques.

B) PARTICULARES.

B.1 Analizar el sistema para ubicar los sensores de nivel.

B.2 La construcción de fuentes de poder para el manejo de válvulas solenoide y de las bombas.

B.3 Instalación, prueba, arranque y paro del tablero de control.

B.4 Instalación física y elaboración de planos para líneas de conducción eléctrica, así como para instrumentos y tablero de control.

B.5 Validación de cada uno de los protocolos propuestos.

B.6 Establecer lineamientos operativos que sean utilizados por el personal usuario del equipo de modo tal que se logre del prototipo tener el período de vida útil más prolongado posible.

CAPÍTULO

1.

FUNDAMENTOS DE

DINÁMICA Y

CONTROL.

1.1 DEFINICIÓN DE LOS CONCEPTOS INVOLUCRADOS EN LA DINÁMICA Y CONTROL DE PROCESOS QUÍMICOS.

La Ingeniería puede describirse, de manera muy general, como la solución de problemas. Una descripción ligeramente más específica es que se trata de la aplicación de la ciencia en el empleo de los recursos disponibles para el beneficio de la humanidad. En este caso, el término ciencia se emplea en su sentido más actual. Si bien hace algún tiempo los principales integrantes de la ciencia eran algunas personas de la física, hoy en día, debido a la creciente diversidad de las actividades humanas y a la generación de nuevos conocimientos, el volumen de leyes científicas en la cual se basa la ingeniería ha aumentado de manera considerable. Las contribuciones más evidentes son las que se refieren al medio ambiente, la conservación de recursos, las tecnologías de la información y de cómputo. Una consecuencia de esta tendencia es que se requiere de mayor creatividad, criterio, intuición y habilidad para integrar conocimiento de los diversos campos, con el fin de resolver los problemas de ingeniería de la actualidad.

Los pasos importantes para la solución de un problema de ingeniería generalmente se sintetizan de la siguiente manera:

1. Formulación del Problema.
2. Análisis del Problema.
3. Búsqueda de soluciones alternas.
4. Selección de la solución deseada.
5. Especificación de la solución seleccionada.

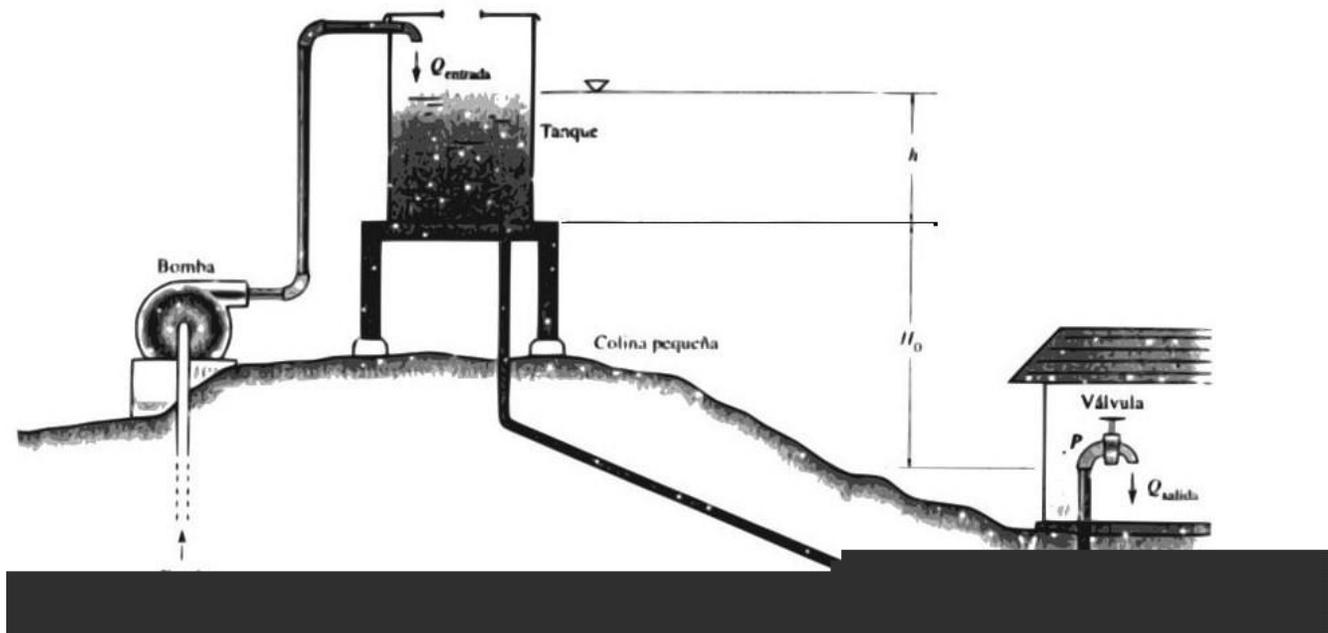
Un Sistema Dinámico es aquel en el cual los “efectos” actuales (salidas) son el resultado de causas actuales y previas (entradas).

En esta definición se introduce la noción de causa y efecto, que muchas veces se utiliza para describir los fenómenos de ingeniería y otros que no forman parte de esta disciplina. La definición anterior difiere de la noción general de un sistema dinámico como aquel que está en movimiento, es decir, que cambia (normalmente de manera rápida) con el tiempo. Los Sistemas dinámicos incluyen sistemas mecánicos, eléctricos, hidráulicos, térmicos, de proceso químico, y mixtos.

Un Sistema Estático es aquel en el que los efectos actuales (salida) dependen sólo de las causas actuales (entradas).

La figura 1.1 muestra un sistema de abastecimiento de agua que, por ejemplo, pudiera ser típico de una granja.

FIGURA 1.7. DINÁMICA DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA.



Por ahora, sólo nos interesan el tanque y la válvula, como subsistemas o componentes. Si la presión en el tubo inmediatamente arriba de la válvula es la presión medida P , y la válvula se descarga a la atmósfera, entonces la caída de presión en la válvula es también P . Si, en este momento, se ignoran la velocidad y la fricción del fluido en la tubería, P es proporcional a la densidad del agua ρ , y a la altura de la columna de agua

$$P = \rho g (h + H_0) \quad (1-1)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, y h y H_0 se definen en la figura. Se ha supuesto que la parte superior del tanque está a la presión atmosférica (el tanque no está completamente cubierto). La relación entre la caída de presión al cruzar una válvula y la razón de flujo volumétrico a través de la válvula es en general (para un flujo *turbulento*) de la siguiente forma

$$Q_{salida} = C \{P\}^{1/2} \quad (1-2)$$

donde C es una constante empírica que representa la apertura y otras características de la válvula.

Considere ahora el tanque como el Sistema. Si se considera como entrada la razón neta de flujo de entrada ($Q_{entrada} - Q_{salida}$), entonces la salida es el resultado en el cambio de nivel, o el propio nivel del tanque h . El nivel de agua en el

tanque en cualquier momento es el resultado de todas las entradas y salidas anteriores de agua. Incluso si todas las operaciones se cerrarán en él hoy, de manera que el nivel actual del tanque permaneciera constante, la cantidad presente de agua en el tanque seguiría siendo el producto de todas las entradas y salidas ocurridas antes. Por lo tanto, el sistema es dinámico. Matemáticamente, la entrada y salida se relacionan a través del volumen de agua en el tanque:

$$\text{Volumen}(t) = \int_0^t \{Q_{\text{entrada}}(t) - Q_{\text{salida}}(t)\} dt + \text{Volumen}(0) \quad (1-3)$$

El volumen y el nivel del agua en el tanque guardan una relación algebraica:

$$h(t) = \text{Función algebraica del volumen}(t) \quad (1-4)$$

Para el caso especial en que la sección transversal del área del tanque A es independiente del nivel,

$$\text{Volumen}(t) = Ah(t) \quad (1-5)$$

Y se tiene entonces que

$$h(t) = \left(\frac{1}{A}\right) \int_0^t \{Q_{\text{entrada}}(t) - Q_{\text{salida}}(t)\} dt + h(0) \quad (1-6)$$

El tanque de agua nos proporciona un modelo muy sencillo de un sistema dinámico básico conocido como *integrador*. Con base en estos resultados es clara la dependencia del nivel actual $h(t)$ respecto de las entradas anteriores. El nivel presente del tanque (h en el tiempo = t) es como se muestra, ya que el tanque “recuerda” todos los flujos anteriores de entrada y salida. Así, nos referiremos también a un sistema dinámico como aquel que tiene *memoria*.

La palabra *memoria* describe asimismo otro modelo de sistema dinámico básico, que llamaremos **retardo** (en el tiempo). Un ejemplo de un operador de retardo es el abastecimiento de agua caliente en una mañana fría de invierno. Si se considera como entrada el acto de abrir la llave –el caudal de agua caliente sale del *calentador* en respuesta a la señal de presión en el grifo- y como salida el flujo de agua caliente que sale de la *llave*, entonces sabemos por experiencia que el agua caliente no aparece de inmediato al abrir la llave (el agua que sale del grifo no está caliente al principio). Más bien, el agua fría se descarga de la tubería hasta que el agua caliente llega del calentador hasta el grifo. El tiempo que esto requiere es el período de retardo o *retraso de transporte* o **tiempo muerto T** , y es evidente que se trata de un sistema dinámico. En términos matemáticos, si el flujo de agua caliente desde el calentador se representa como $Q(t)$, entonces el flujo de agua caliente del grifo está dado por $Q(t - T)$ y se comprende que la función $Q(t - T)$ es la misma que $Q(t)$, pero trasladada T unidades de tiempo a la derecha.

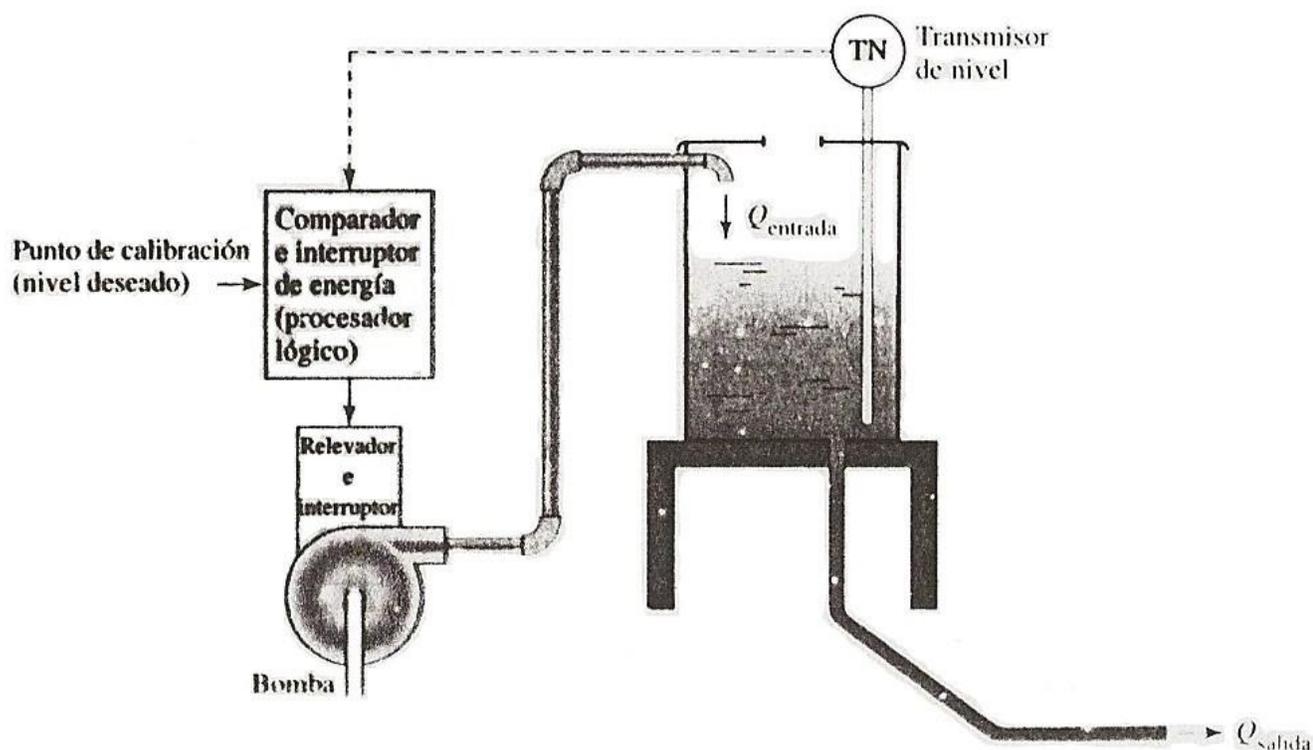
1.1.1 CONCEPTO DEL CONTROL POR RETROALIMENTACIÓN.

Si para un sistema dinámico la salida presente depende de las entradas anteriores, entonces, al introducir las entradas apropiadas en el presente, es posible influir en la salida en un futuro inmediato. Es razonable esperar que la especificación de la entrada adecuada requiera al menos de cierto conocimiento sobre el funcionamiento del sistema y que sea posible lograr los resultados deseados (la subsecuente salida) si se conoce la salida presente. Por lo general, la operación del sistema se representa con algún modelo de su comportamiento, y la determinación más directa de la salida presente es una medición.

Consideremos de nuevo el abastecimiento de agua de la figura 1.1. Con base en el análisis anterior, es evidente que la operación del sistema del tanque de agua está bastante bien determinada. Como lo demuestran ecuaciones, el flujo de un grifo, y ciertamente en cualquier punto en el que se emplee el agua, es una función del nivel del tanque de agua, h . Algunas de las aplicaciones del abastecimiento de agua (tomando una vez más la granja como ejemplo) pudieran ser bastante sensibles al flujo o presión del agua en el punto en el que se le emplea. Las boquillas de presión para lavar el equipo o para limpiar los productos o los componentes del sistema de irrigación por aspersores son dos buenos ejemplos. ¿Cómo asegurar que el nivel del tanque de agua permanezca suficientemente alto y con regularidad adecuada para estas aplicaciones? Una manera sencilla, suponiendo que durante lapsos significativos el volumen de agua empleado en los diversos lugares es más o menos uniforme y predecible, y que es posible tolerar en las aplicaciones cierta variación en la presión, y por tanto en el desempeño, sería operar la bomba y llenar el tanque con el agua del pozo con base en cierto tipo de programa de tiempos.

La figura 1.2a muestra la forma en que el nivel real del tanque depende de la operación programada de la bomba o del nivel deseado del tanque. Si bien el programa de operación de la bomba puede deducirse de, por ejemplo, el análisis estadístico de los datos pasados del uso del agua en la granja, no hay nada en el esquema de control de la figura 1.2a que prescriba relación alguna entre una variable del tanque y la otra (en este caso, las variables son $Q_{entrada}$ y h . El término Q_{salida} se relaciona con h mediante el parámetro de apertura de la válvula, C , que en este caso se toma como una perturbación del sistema, o entrada de perturbación). Ciertamente, si en cualquier momento la manera de usar el agua (la apertura equivalente de la válvula) debiera desviarse de manera significativa de aquel en el que se basa el programa de la bomba, el sistema de control fallaría u operaría muy deficientemente. Este tipo de esquema de control se conoce como **control de lazo abierto**.

FIGURA 1.8a. CONTROL AUTOMÁTICO DE LAZO CERRADO DEL NIVEL DEL TANQUE.



(b) Control automático de lazo cerrado del nivel del tanque

En la figura 1.2b se observa la estructura de un sistema de lazo abierto. La característica o variable específica del sistema, la salida, que se desea controlar, se conoce como *variable controlada*, en tanto que la característica o variable que se determina por medio de la acción de control se conoce como *entrada de control*. De manera colectiva, los elementos de control pueden llamarse *controladores*, aunque, como se verá más adelante, pueden encontrarse en otros subgrupos. Por lo general, la *entrada de referencia* supone el valor deseado de la variable controlada. En la figura 2b, el lazo es abierto en el sentido de que la entrada de control no puede determinarse en términos de la variable controlada, es decir, el controlador no prescribe una relación entre la entrada de control y la variable controlada.

FIGURA 1.9b. CONTROL DE LAZO ABIERTO DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA.

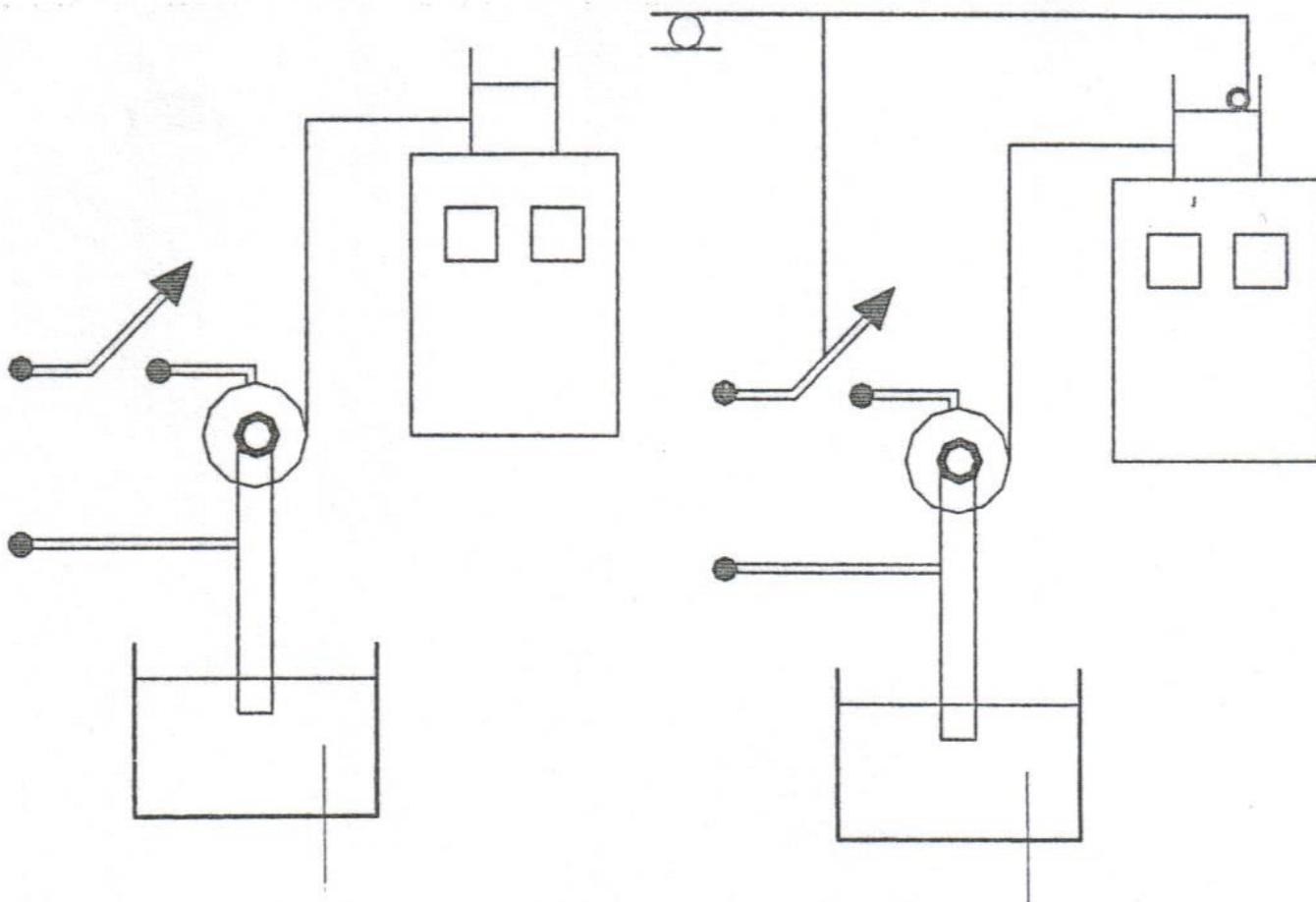


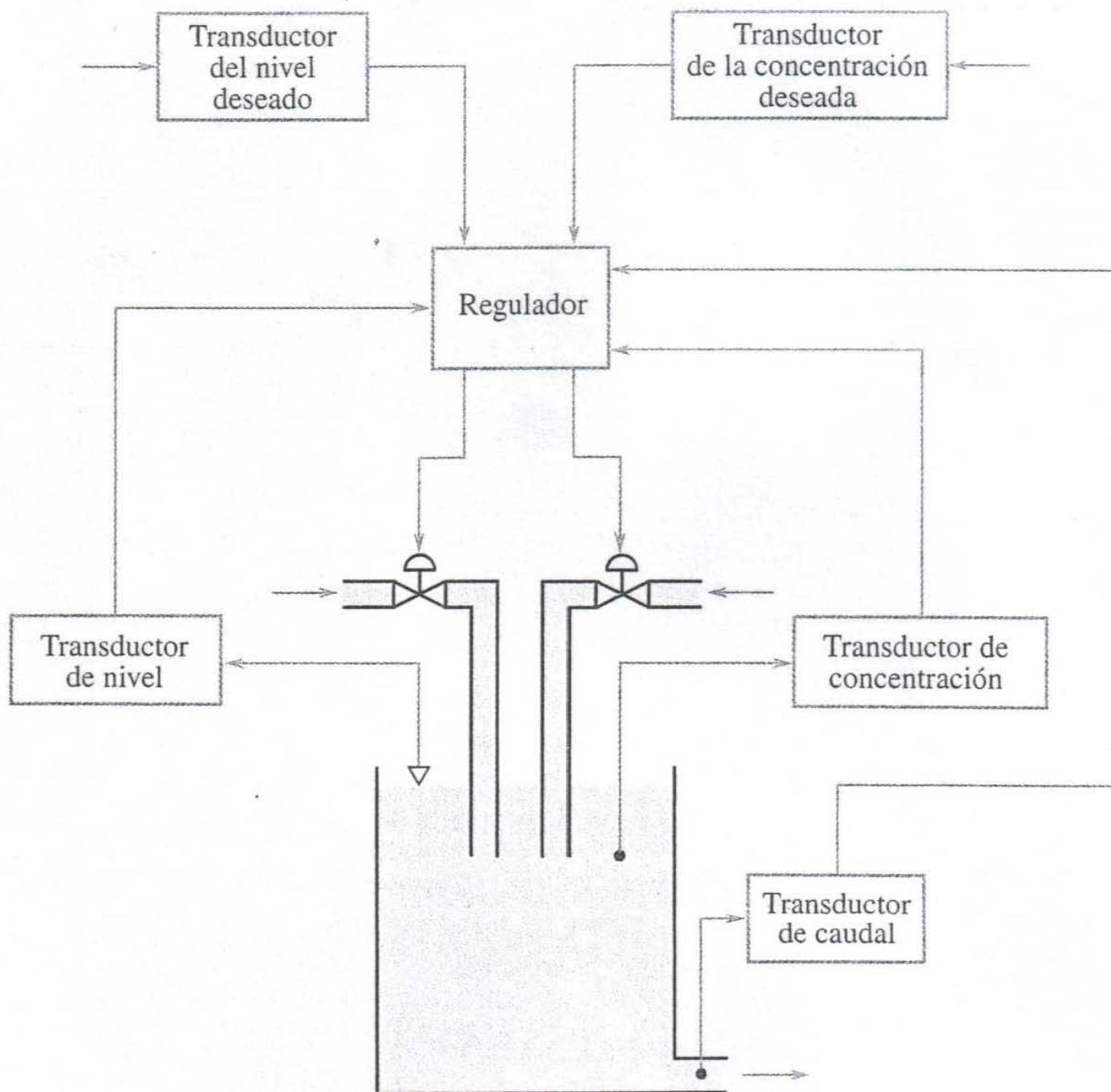
FIGURA 1.3a. PROCESO CON CONTROL.

1.1.2 ESTRUCTURA DEL CONTROL POR RETROALIMENTACIÓN.

Otra manera de tratar el control del nivel del tanque de agua es tener un operador que encienda la bomba cada vez que el nivel del tanque baje del nivel de referencia y la apague de nuevo cuando el tanque sobrepase dicho nivel. Para facilitar el trabajo del operador, es posible conectar al tanque un sistema de medición y transmisión, y un indicador de nivel (TN e IN), y emplearlos para mostrar el nivel del tanque al operador (vea la figura 1.3a). El resultado es un sistema de **control de lazo cerrado**, ya que existe una relación prescrita (aunque de interruptor) entre el nivel del tanque y el flujo de entrada. El operador que observa el nivel del tanque proporciona la vía para cerrar el lazo. Sin embargo, un sistema de control con un ser humano como un elemento del controlador es manual, es decir, no es automático. En una granja ocupada, en la que un empleado no se puede dedicar exclusivamente a la operación de la bomba, es obvio que tal control sería inadecuado o insatisfactorio. La figura 1.3b muestra un ejemplo de sistema de control *automático* (de

lazo cerrado) para el nivel del tanque. En este caso, la comparación de la señal del nivel del tanque con el valor deseado (que se proporciona al sistema como el punto de calibración) y el encendido y apagado de la bomba lo realiza el equipo apropiado en el controlador. Sin embargo, observe que los sistemas manuales y automáticos descritos arriba suponen:

FIGURA 1.10b. CONTROL MANUAL Y AUTOMÁTICO DEL NIVEL DEL AGUA EN EL TANQUE.

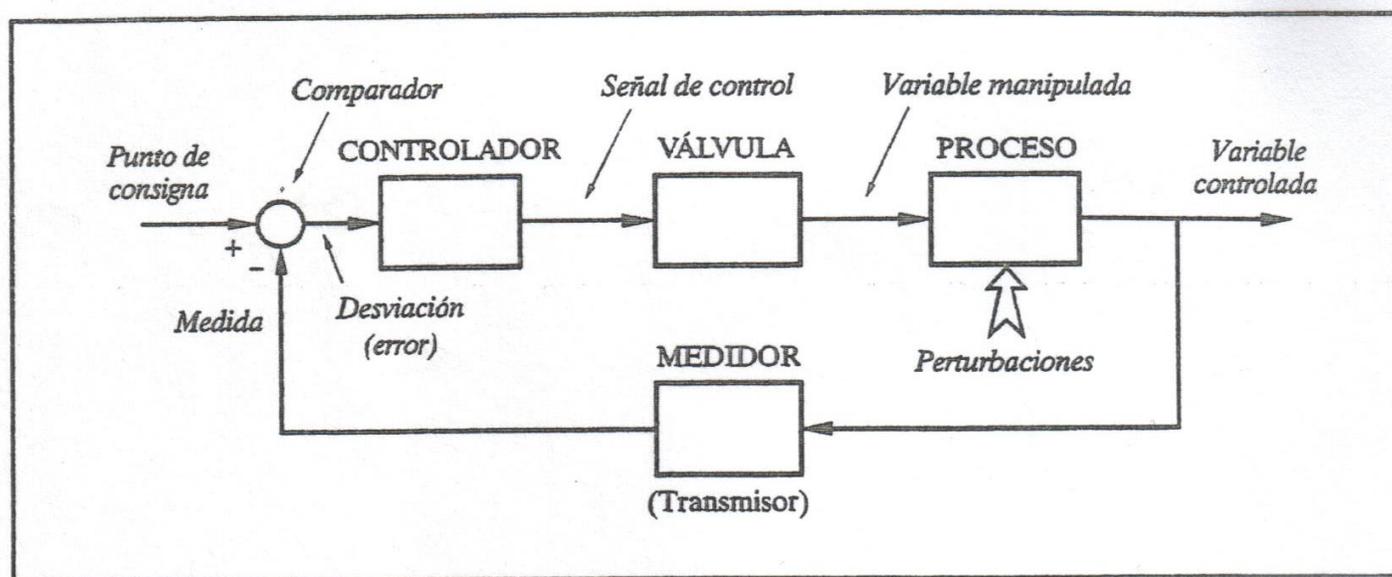


- Mantener (a pesar de ciertas interferencias externas) cierta relación prescrita de una variable del sistema con otra, empleando el resultado de una comparación entre estas variables;
- Transmitir alguna señal o información desde una etapa posterior (salida) del sistema a otra previa (entrada); es decir, cerrar el lazo mediante una *retroalimentación*.

En el control por retroalimentación se utiliza una medición de la salida del sistema para modificar la entrada, de tal forma que la salida permanezca próxima al valor deseado.

Existen muchos sistemas, tanto de los que ocurren de manera natural como artificial, cuya operación apropiada depende del control por retroalimentación. Por lo general, en todos los casos existe un instrumento de medición (*sensor*) o *elemento de retroalimentación* que mide la variable de salida o del que interesa y transmite la medida a un *controlador*. Este compara la señal con el valor deseado o *punto de calibración*, y envía las instrucciones pertinentes al mecanismo *actuador* (o *elemento final de control*), que a su vez actúa sobre el sistema u *objeto de control* (o *planta*), para adecuar las salidas subsecuentes (relación prescrita) con el punto de calibración. Lo que se ha descrito es la estructura típica de un control por retroalimentación (o de lazo cerrado), véase figura 1.4.

FIGURA 1.11. ESTRUCTURA TÍPICA DE CONTROL.



1.1.3 OTROS TIPOS DE CONTROL.

Hasta ahora, el análisis ha sugerido varias clasificaciones o tipos de sistemas de control. Se ha visto que los sistemas de control pueden ser de lazo abierto o cerrado, manuales o automáticos, y, en un sentido universal, que ocurren de manera natural o bien contruidos por el hombre. Existen muchos otros tipos de sistemas de control que pueden

clasificarse con base en los diversos aspectos del tema o disciplina. Por ejemplo, las clasificaciones naturalmente o hechos por el hombre, manual o automáticamente, pueden considerarse clasificaciones basadas en factores sociales o del entorno. La Tabla 1 resume los tipos de sistemas de control.

TABLA 1. TIPOS DE SISTEMAS DE CONTROL.

BASE	TIPO	
1. Del entorno social	Que ocurren de manera natural	Hecho por el hombre Manual Automático
2. Naturaleza del Lazo	Prealimentación de Ciclo abierto	De lazo cerrado Sencillo o múltiple Cascada Multivariable
3. Naturaleza del Controlador	Continua o discontinua Analógica o Digital Numérica De supervisión o jerárquica Distribuida	
4. Naturaleza de la planta	De tiempo continuo o discreto De muestreo de datos Lineal o no lineal	
5. Tipo de Variable Controlada	Servomecanismo Control de Proceso Control de altitud, de nivel, de temperatura, etc.	
6. Naturaleza del punto de calibración	Regulador Seguimiento	
7. Tipo de ley de control	P, PI, PID, compensador, retroalimentación, del vector de estado, etc. Bang- Bang (encendido-apagado) Lineal o no lineal En tiempo óptimo Tiempo de establecimiento óptimo, regulador óptimo Adaptable Control de modelo de referencia adaptable, regulador autosintonizable Robusto	
8. Técnica analítica o de diseño	Dominio del tiempo/espacio de estado o dominio de frecuencia Sistema de control estocástico, H_∞ , etc. Clásico o moderno	

NATURALEZA DEL CONTROLADOR: CONTROL DISCONTINUO VERSUS CONTROL CONTINUO.

Los controladores considerados hasta ahora son *discontinuos* en su operación. En particular, la acción de control (operación de la bomba), o la ley de control, es de *encendido-apagado*, llamada también *bang-bang*. La bomba está encendida (se supone que a una velocidad tope y con un máximo desplazamiento) o apagada (cero flujo). Esto contrasta con el control *continuo*, en el que la salida del controlador (variable manipulada) es una función continua de la entrada del controlador (variable de error). La figura 1.5 muestra un ejemplo de un sistema de control continuo en el nivel de un tanque. En este caso, la variable manipulada es la posición del vástago de la válvula de flujo de entrada. Así, la tasa de entrada de flujo de agua al tanque, $Q_{entrada}$, es continuamente variable, suponiendo la existencia de una fuente constante de abastecimiento de agua.

Con base en la variable controlada, los sistemas de control de nivel del tanque de agua pueden llamarse *sistemas de control de nivel de líquido*. Otros ejemplos de variables controladas incluyen altura (como el sistema de control de altura en una nave espacial), cabeceo (como el sistema de control de cabeceo de un avión), velocidad (como por ejemplo un motor de corriente directa), posición fuerza, par de torsión, presión, flujo, corriente, voltaje, flujo magnético, frecuencia, temperatura, humedad, densidad, concentración y composición química.

1.1.4 DEFINICIÓN DE UN SISTEMA.

La palabra sistema se utiliza en forma muy general no sólo en ingeniería, sino también en otras disciplinas, por ejemplo, en química, matemáticas y política. Es posible definir un sistema como algo hecho a partir de componentes de modo que es posible predecir el comportamiento de la combinación global si (a) se puede predecir el comportamiento de cada uno de los componentes, y (b) se conoce la interacción entre ellos.

Etapas de un estudio dinámico. ¿Cómo realizar una investigación dinámica? ¿Qué se necesita? Es posible responder a estas preguntas describiendo los diversos pasos de un estudio dinámico. El primer paso consiste en *especificar el sistema o componente* que se ha de estudiar.

El segundo paso en un estudio dinámico es la *construcción del modelo del sistema*. Si uno tiene los recursos, la capacidad y el tiempo que se requieren, es ideal construir o adquirir el sistema especificado. Por lo general, se construye un modelo matemático consistente de varias ecuaciones.

El tercer paso es *resolver el modelo* o las ecuaciones. El último paso es el *diseño*.

FIGURA 1.12. CONTROL CONTINUO DEL NIVEL DEL TANQUE.

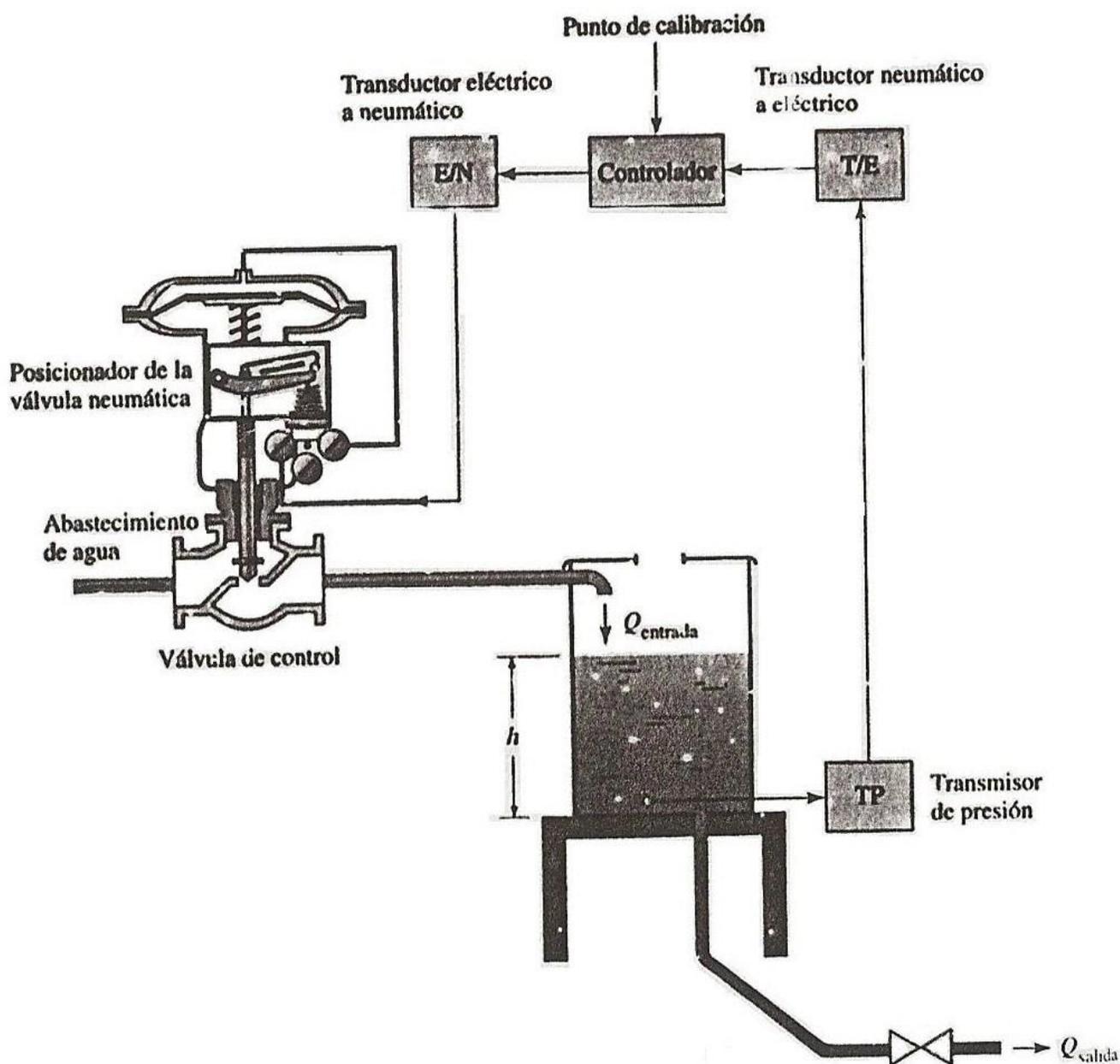
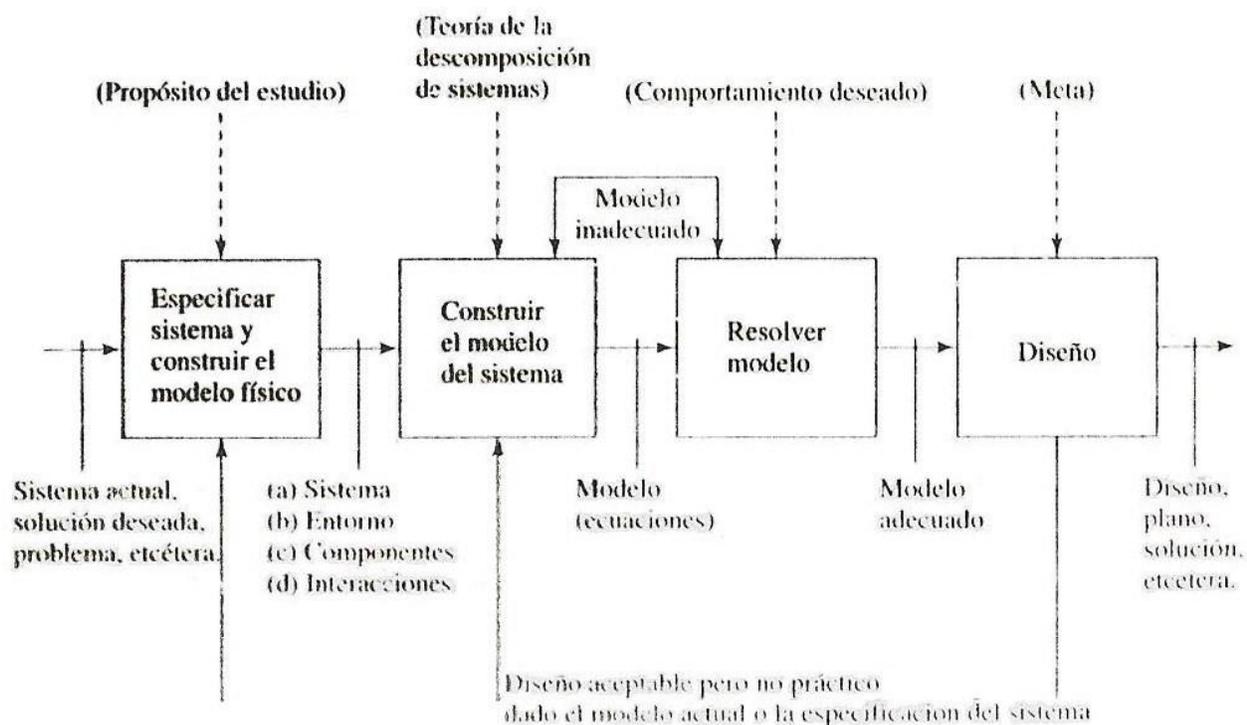


DIAGRAMA DE BLOQUES.

Es posible resumir las etapas del estudio dinámico como se muestra en la figura 1.6. La figura representa, de manera muy general, un *diagrama de bloques*. Un diagrama de bloques es una secuencia de causas y efectos. Divide lo que está bajo investigación en subsistemas o bloques, cada uno de los cuales puede estudiarse con mayor facilidad.

FIGURA 1.13. DIAGRAMA DE BLOQUES (FLUJOGRAMA) DE LAS ETAPAS DE UN ESTUDIO DINÁMICO.



EL MODELADO FÍSICO.

El objetivo de la especificación de sistemas y el modelado físico consiste en proporcionar una descripción del sistema que sea lo más precisa posible, aunque lo bastante sencilla como para permitir el análisis y diseño subsiguientes. En general, un modelo físico se construye aislando una parte del universo como el sistema de interés y luego dividiendo conceptualmente su comportamiento en componentes conocidos.

Las aproximaciones se hacen en las descripciones del comportamiento de los componentes del modelo físico, con el fin de aprovechar las teorías existentes y bien desarrolladas, así como para reducir al mínimo la complejidad de las herramientas analíticas necesarias. En todo momento, las consideraciones importantes que hay que tomar en cuenta es cuánto compromiso debe tenerse y cuáles aproximaciones son válidas. La capacidad de resolver la primera consideración se da en la práctica y el ejercicio de un criterio maduro. Las aproximaciones se validan mediante un proceso iterativo de construcción y solución de modelos. Si el modelo del sistema se construye con base en suposiciones inválidas, cuando se compare la solución, con el comportamiento esperado, se tendrá un modelo deficiente, que necesitará nuevas aproximaciones y la construcción de un nuevo modelo.

El concepto de sistemas implica el proceso de aislamiento conceptual de una parte del universo que sea de interés, que llamaremos el sistema, y las especificaciones de las interacciones entre este sistema y el resto del mundo, esto es, el entorno. El límite entre un sistema y su entorno es imaginario.

CONCEPTO DE ESTABILIDAD.

Se entiende por estabilidad la capacidad que tiene un sistema para amortiguar con el tiempo y anular totalmente las oscilaciones de la respuesta ante una perturbación. Podemos considerar dos tipos de estabilidad: *absoluta* y *relativa*.

En la estabilidad absoluta, la variable vuelve al punto de consigna o a un valor estable después de una perturbación, sin importar el tiempo que esté oscilando hasta anularse. Es decir, los criterios correspondientes no indican lo próximo que esté el sistema de la inestabilidad.

En la estabilidad relativa, la variable vuelve al punto de consigna o a un valor estable después de una perturbación en un tiempo limitado, con la condición de que cada oscilación tenga un cuarto de la amplitud de la oscilación precedente.

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EN DINÁMICA Y CONTROL DE PROCESOS.

Relación matemática, gráfica o tabular entre las expresiones función del tiempo de las señales de salida y de entrada a un sistema o elemento. Equivale también al cociente de las transformadas de Laplace de las funciones de respuesta y de excitación.

1.2 LA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA. INTRODUCCIÓN.

La medida consiste en la determinación de una magnitud por comparación con un estándar. Aunque algunos de nuestros sentidos puedan parecernos, a priori, extraordinariamente desarrollados, la percepción y medida de magnitudes físicas no puede realizarse con precisión. En primer lugar, no todos percibimos de la misma forma, por lo que se hace muy difícil cuantificar con objetividad. Además, los sentidos son incapaces de estimar ciertas variables físicas. Así, por citar algunos ejemplos, no podemos percibir ondas sonoras de una frecuencia superior a 20 kHz, ni tampoco ondas electromagnéticas que salgan fuera de nuestro reducido espectro visible. Para suplir estas deficiencias se recurre a los instrumentos de medida. Los instrumentos son capaces de cuantificar de forma sistemática y de “ver” lo que el hombre no es capaz de ver. Un microscopio, por ejemplo, es un instrumento óptico que nos permite reconocer objetos extraordinariamente pequeños y una simple cinta métrica, otro instrumento del que nos valemos para estimar distancias.

El ser humano percibe la información del mundo que le rodea a través de sus sentidos y adquiere el conocimiento, sobre todo el científico, cuando es capaz de cuantificar las magnitudes que percibe, es decir, a través de la medida. Según J. Ferrero: “La instrumentación comprende todas las técnicas, equipos y metodologías relacionadas con el diseño, la construcción y la aplicación de dispositivos físicos para mejorar, completar y aumentar la eficiencia de los mecanismos de percepción del ser humano”.

Entre los instrumentos, gozan de especial interés aquellos que utilizan técnicas electrónicas para realizar la medida. Por ello, una de las tecnologías de instrumentación más avanzadas es la denominada **Instrumentación Electrónica** que es la técnica que se ocupa de la medición de cualquier tipo de magnitud física, de la conversión de la misma a magnitudes eléctricas y de su tratamiento para proporcionar la información adecuada a un sistema de control, a un operador humano o a ambos. La instrumentación electrónica tiene su campo de aplicación en numerosas actividades relacionadas con la ciencia y la tecnología donde la electrónica se incorporó de forma masiva. En el laboratorio y en la industria se realiza un uso intensivo de la instrumentación electrónica porque en estos entornos, como en otros muchos, es necesario medir para conocer.

VARIABLES Y SEÑALES.

La información de las variables que se pretenda capturar se almacena en algún tipo de variable eléctrica, generalmente tensión. Esta variable eléctrica es lo que se denomina **señal**. La naturaleza de las variables y de las señales que las contienen puede ser igual o distinta: en el primer caso, variable y señal coinciden (o son proporcionales) mientras que, en el segundo, la variable se almacena “dentro” de alguno de los parámetros de la señal. En cualquiera de los casos, variables y señales pueden clasificarse siguiendo varios criterios, pero aquí nos fijaremos en aquellos que resultan interesantes desde el punto de vista de la instrumentación electrónica. De esta forma, tenemos:

- Variables analógicas** cuando los datos constituyen un conjunto denso, es decir, que puede tener cualquier valor dentro de un intervalo determinado según se indica en la figura 1.7a, lo que implica que el número total de valores es infinito.
- Variables digitales** cuando los datos constituyen un conjunto finito de valores; un caso particular de este tipo de variables es el sistema binario que permite dos valores diferentes, denotados normalmente por “0” y “1” (figura 1.7b).

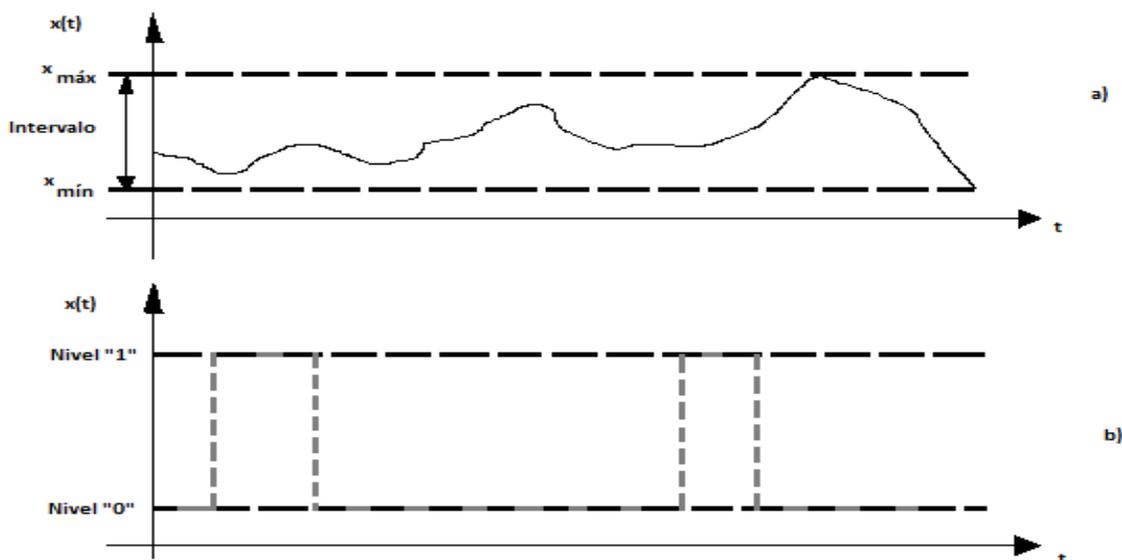


FIGURA 1.7 TIPOS DE VARIABLES. REPRESENTACIÓN DE: A) UNA VARIABLE ANALÓGICA Y B) UNA VARIABLE DIGITAL BINARIA.

Las señales, igual que las variables, pueden clasificarse según el mismo criterio, obteniendo señales analógicas y señales digitales. Tengamos en cuenta que una señal digital o una señal analógica puede contener variables (informaciones) tanto digitales como analógicas. Esto se observa mejor en las figuras 1.8a y 1.8b donde se muestra una variable analógica o en la figura 1.8d, en que aparece una variable digital: ambas pueden incluir diversas variables cuya naturaleza puede ser analógica o digital.

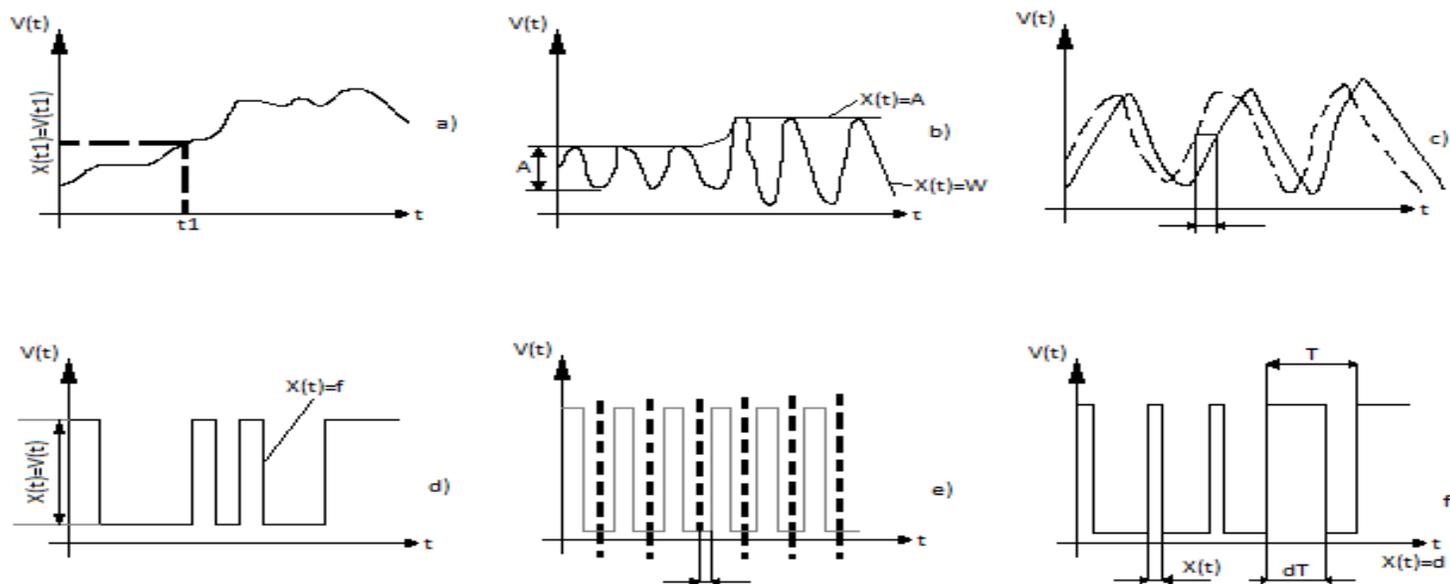


FIGURA 1.8 SEÑALES QUE GUARDAN INFORMACIÓN ACERCA DE VARIABLES: el valor que interesa se guarda en a) el valor instantáneo, b) la amplitud, c) la fase de una señal periódica, d) la frecuencia de una señal digital, e) la fase de una señal digital

Teniendo en cuenta lo anterior, tenemos que una señal analógica $v(t)$ puede contener información $x(t)$ en cualquiera de los parámetros que la definen:

- a) En su **valor instantáneo** en cuyo caso la variable contenida coincide con la señal o es proporcional a ella según aparece en la figura 1.8a:

$$v(t) = K x(t) \quad (1.1)$$

- b) En su **amplitud** en el caso de ser una señal periódica (figura 1.8b):

$$v(t) = K' x(t) \text{ sen } (\omega t) \quad (1.2)$$

- c) En su **frecuencia**, también en el caso de estar en presencia de una señal periódica (figura 1.8b):

$$v(t) = A \text{ sen } (K'' x(t) t) \quad (1.3)$$

- d) En su **fase** (figura 1.8c), con lo que la variable que tenemos es

$$v(t) = A \text{ sen } (\omega t + K''' x(t)) \quad (1.4)$$

Cuando la señal $v(t)$ es digital, se puede almacenar también información $x(t)$ tanto digital como analógica en los parámetros que determinan el aspecto de la señal:

- a) Información en el **nivel**, en cuyo caso, la información debe ser digital y la señal deberá contener –al menos– tantos niveles como los que se quieran distinguir en la variable original. En la figura 1.8-d se ha dibujado una señal binaria que, sólo podrá almacenar dos posibles estados de la variable.
- b) En su **frecuencia** (figura 1.8-d) lo que constituye un caso particular del de una variable analógica pero en la que se ha sustituido la senoide por una cuadrada.
- c) En su **fase** (figura 1.8-e) también similar al caso anterior de señal analógica.
- d) En la **duración de los pulsos** o en el **ciclo de trabajo** de la señal (figura 1.8-f).

Hay que tener en cuenta que una determinada señal puede contener más de una variable de información, almacenada en sus diversos parámetros. Pero, desgraciadamente, tanto las variables como las señales no suelen ser tan simples como las indicadas en las figuras 1.7 y 1.8, sino que contienen factores que tienden a dificultar su lectura. En efecto, cualquier señal o variable puede “contaminarse” por otras variables no deseadas y de difícil control a lo que llamaremos, en general, “ruido”. Sí interesa clasificar las señales desde este punto de vista como:

- a) **Señales deterministas** en las que la señal sólo contiene la información o informaciones que interesan (figura 1.9a)
- b) **Señales aleatorias o pseudo-aleatorias** en las que, sobre los niveles de la señal que interesa, aparecen niveles de ruido (figura 1.9b) que modifican el valor de la señal. Estos niveles pueden afectar o no a la variable (información contenida).

En general, todas las señales tienen un cierto componente de aleatoriedad lo que implica que todas son aleatorias y ninguna es estrictamente determinista; sin embargo, sí los niveles del ruido son bajos en relación con los de la señal o su información no se ve afectada por aquel, cabe considerar el caso como determinista y esto es lo que se hace en multitud de ocasiones.

Cuando los niveles de ruido son elevados, la señal cae dentro del área de las aleatorias y requerirá un tratamiento estadístico específico. A este respecto, cabe decir que el ruido que se añade en la señal puede tener dos orígenes distintos:

- a) Ruido que no contiene información alguna y que corresponde a la idea exacta de una señal aleatoria que se añade a la nuestra. Se trata de un ruido sin ningún tipo de estructura.
- b) Ruido que sí contiene información y que tiene estructura definida, es decir, un patrón de comportamiento y que, por ello, no cabe calificarlo como aleatorio y se usará el término pseudoaleatorio (figura 1.9c). Este ruido puede contener información útil que interese extraer o información no deseada como en el caso de una interferencia de 50 Hz de red que se “cuela” en nuestro sistema: no es aleatorio ya que sigue el patrón de la red eléctrica (con una cierta aleatoriedad) pero no nos interesa para nada. En cualquier caso, dado lo difícil de predecirlo o controlarlo cabe calificarlo como ruido.

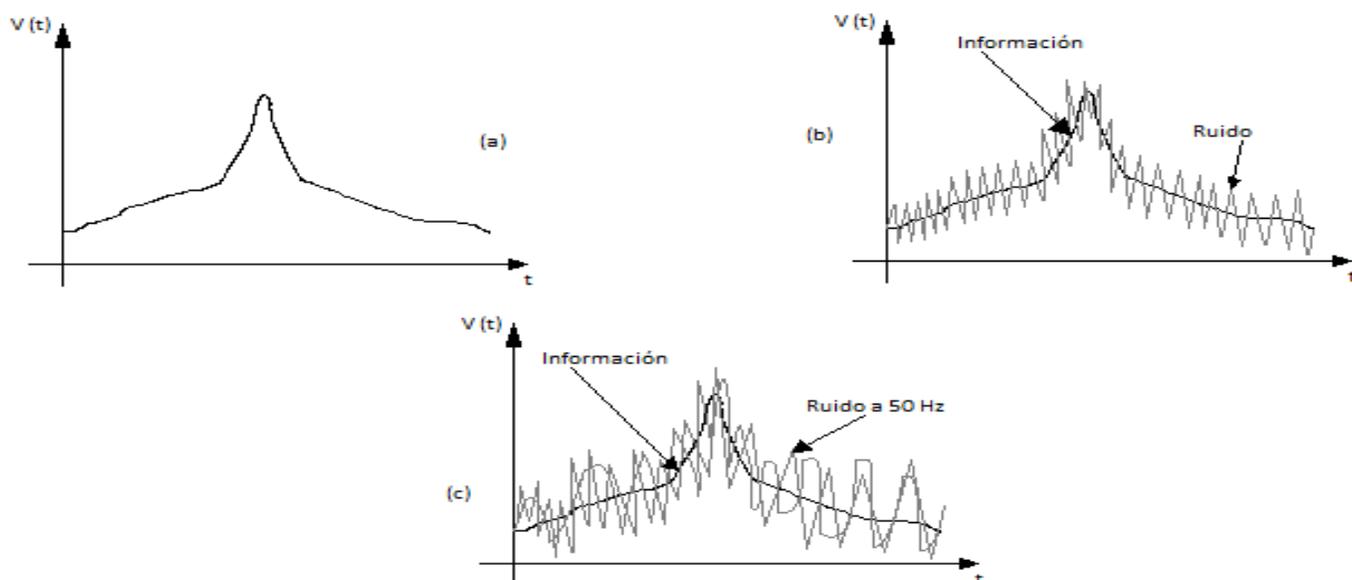


FIGURA 1.9. RUIDO EN UNA SEÑAL. A) SEÑAL DETERMINISTA; B) SEÑAL ALEATORIA QUE INCLUYE INFORMACIÓN Y RUIDO ALEATORIO; C) SEÑAL PSEUDOALEATORIA QUE INCORPORA LA INFORMACIÓN Y UN RUIDO CON ESTRUCTURA.

La instrumentación electrónica cobra su máximo protagonismo en el entorno industrial y adquiere una relevancia especial en lo que hace referencia al control de procesos. El concepto de control es extraordinariamente amplio y abarca escenarios de complejidad muy diversa. En su concepción más simple, el control alude al gobierno de un sistema por otro sistema. Cuando se habla de instrumentar cualquier sistema físico se refiere a añadirle todos los sistemas de captación que sean capaces de leer los parámetros físicos que formen parte de él. La figura 1.10 representa los elementos esenciales de un sistema de medida en el contexto del control de procesos.

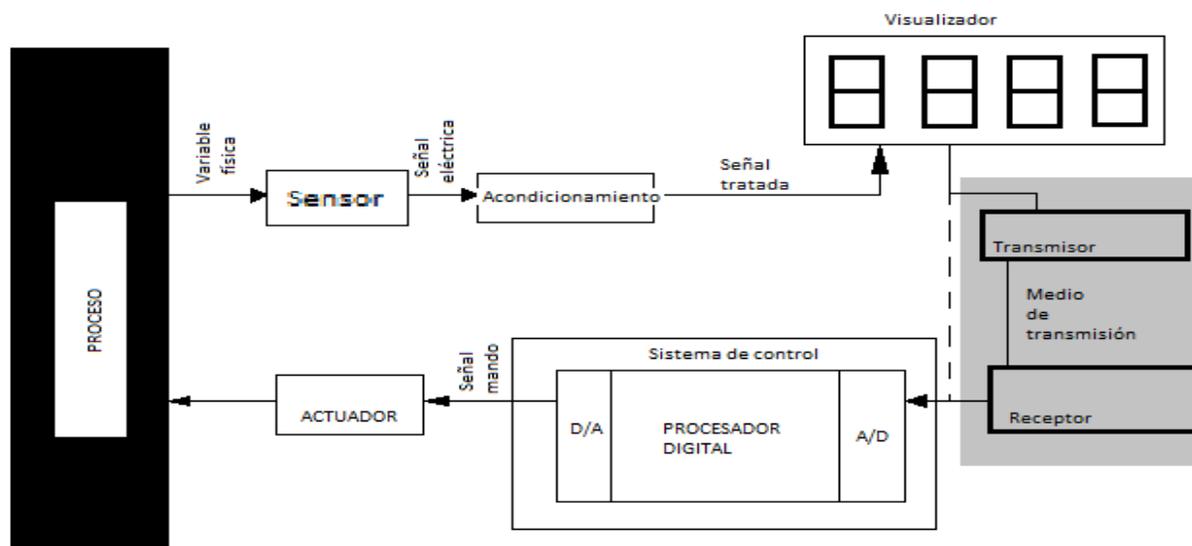


FIGURA 1.10. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE MEDIDA EN EL CONTEXTO DEL CONTROL DE PROCESOS.

Los bloques básicos que se reflejan en la figura, son:

- a) **Sensor:** su misión es capturar la variable de proceso, variable física, y convertirla en una señal eléctrica.
- b) **Acondicionamiento de señal:** trata la señal eléctrica para adaptarla al siguiente bloque de la cadena. El acondicionamiento puede incluir: amplificación-filtrado; conversión de niveles; conversión de tensión a corriente, y viceversa; conversión de tensión a frecuencia, y viceversa; linealización; etc.
- c) **Visualización:** unidad que presenta la información al operador.
- d) **Sistema de control:** procesa los datos de acuerdo al algoritmo de control y genera la señal de mando. Los sistemas de control pueden ser:
 - a. Analógicos: emplean circuitos analógicos para el control.
 - b. Digitales: basados en procesadores digitales.
- e) **Actuadores:** conjunto de dispositivos que modifican la respuesta del sistema.
- f) **Sistemas de transmisión remota:** permite transmitir la información entre la planta y el sistema de control en el caso de que estén alejados uno del otro.

1.3 SISTEMA DE MEDIDA.

Un sistema de medida electrónico es aquel equipo cuya finalidad es obtener información acerca de un proceso físico y presentar dicha información en la forma adecuada a un observador o a otro sistema técnico de control (figura 1.11). Existen multitud de magnitudes físicas susceptibles de ser medidas, si bien cada una de ellas podría considerarse dentro de los tipos de variables que muestra la tabla 2.

FIGURA 1.11. OBJETO DE UN SISTEMA DE MEDIDA.

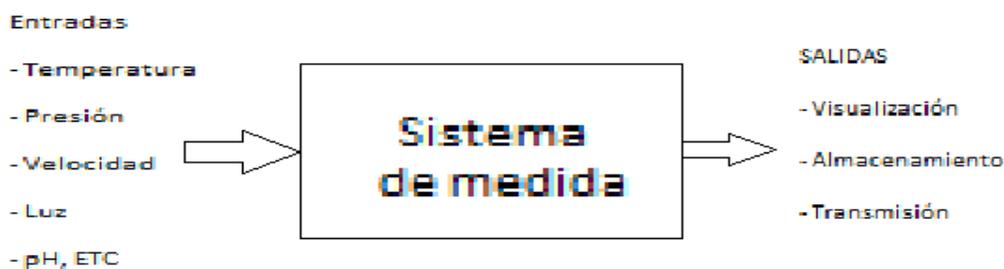


TABLA 2. NATURALEZA Y TIPOS DE VARIABLES.

Naturaleza de la variable	Tipo de variable
Mecánica	Desplazamiento, velocidad, aceleración, fuerza, par, presión, masa, flujo, etc.
Térmica	Temperatura, calor, entropía, etc.
Magnética	Campo magnético, flujo, permeabilidad magnética, etc.
Eléctrica	Carga, corriente, tensión, resistencia, conductancia, capacidad, permitividad dieléctrica, polarización, frecuencia, etc.
Óptica	Rayos gamma, rayos X, ultravioleta, visible,

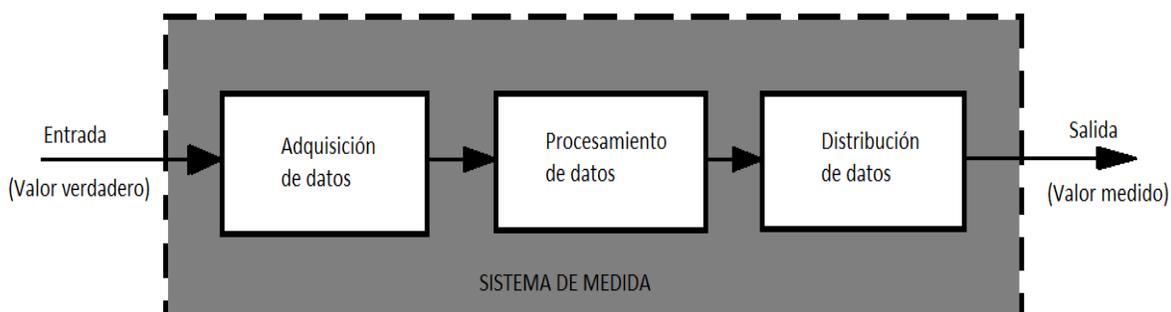
	infrarrojo, microondas, etc.
Química	Humedad, pH, concentración iónica, análisis de gases, etc.
Biológica	Proteínas, hormonas, antígenos, etc.

FUNCIONES DE UN SISTEMA DE MEDIDA.

Considerando el sistema de medida como una caja negra, la entrada sería el **valor verdadero** de la variable a medir y la salida, el **valor medido**. Sólo en el caso ideal, la diferencia entre ambos valores será nula por lo que siempre cometeremos un **error de medida**. Las causas de este error son de origen diverso: ruido del sistema de medida, interferencias exteriores, desviaciones en los parámetros de componentes, mala calibración, etc. En un sistema de medida podemos distinguir tres funciones principales: adquisición de datos, procesamiento de datos y distribución de los datos (figura 1.12):

- Adquisición de datos.** La información de las variables a medir es adquirida y convertida en una señal eléctrica. De esta etapa dependerá en gran medida las prestaciones del sistema de medida.
- Procesamiento de datos.** Consiste en el procesamiento, selección y manipulación de los datos con arreglo a los objetivos perseguidos. Esta función suele ser realizada por un procesador digital, tipo microcontrolador o procesador digital de señal.
- Distribución de datos.** El valor medido se presenta a un observador (por ejemplo, mediante un display), se almacena (por ejemplo, en disco o en un chip de memoria) o bien se transmite a otro sistema.

FIGURA 1.12. FUNCIONES PRINCIPALES DE UN SISTEMA DE MEDIDA ELECTRÓNICO.



A su vez, la función de adquisición de datos puede dividirse en unidades funcionales más pequeñas como se muestra en la figura 1.13. En primer lugar, la variable del mundo físico se convierte a una señal eléctrica mediante un **sensor** a fin de poder procesarla adecuadamente. Con frecuencia, la señal procedente del sensor tiene unas características que la hacen poco adecuada para ser procesada: señal de pequeño nivel, espectro grande, falta de linealidad, etc. Se hace, pues, necesaria una etapa de **acondicionamiento** de la señal. Este acondicionamiento consiste en realizar alguna de las siguientes operaciones básicas:

- Amplificación:** incrementar el nivel de potencia de la señal.
- Filtrado:** eliminar las componentes de la señal no deseadas.
- Linealización:** obtener una señal de salida que varíe linealmente con la variable que se desea medir.
- Modulación/Demodulación:** modificar la forma de la señal a fin de poder transmitirla a largas distancias o a fin de reducir su sensibilidad frente a interferencias durante el transporte.

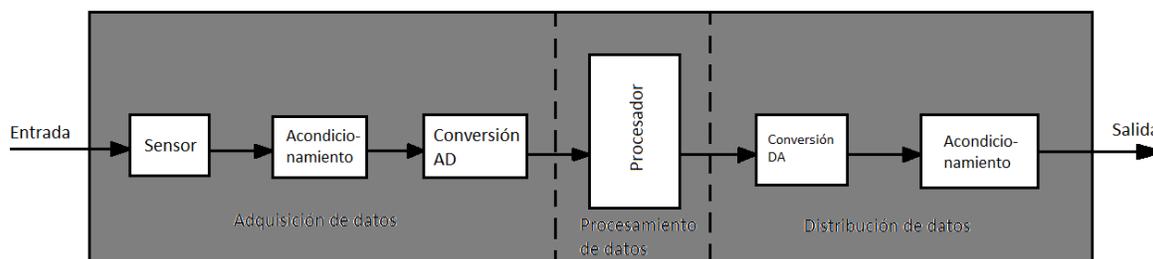


FIGURA 1.13. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE MEDIDA.

Después del acondicionamiento, la señal se convierte del mundo analógico al digital mediante un convertidor analógico-digital (ADC). La salida del ADC se procesa mediante un procesador digital de señales, que en muchas ocasiones puede integrar el ADC. Una vez procesada la señal puede ser necesario entregar la información en forma analógica, en cuyo caso es necesario proporcionar otra interfaz desde el dominio digital al analógico mediante un convertidor digital-analógico (DAC). Finalmente, la señal del procesador se puede enviar a un observador para su visualización, almacenada en memoria o enviar a otro equipo de medida o sistema de control.

El esquema de la figura 1.13 corresponde a un sistema de un solo canal de medida. En la mayoría de las situaciones se hace necesario procesar más de una variable de entrada. La figura 1.14 muestra una primera solución, en la que un multiplexor analógico se encarga de llevar las señales acondicionadas de los sensores a un único ADC.

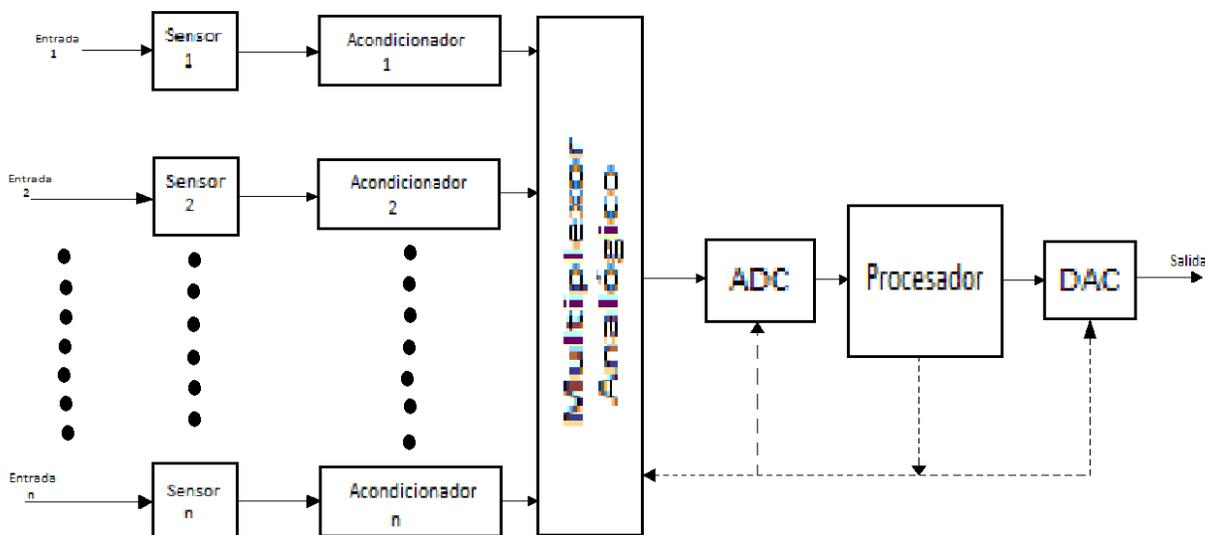


FIGURA 1.14. SISTEMA DE MEDIDA MULTICANAL CON UN SOLO ADC.

La estructura anterior no es adecuada cuando la aplicación requiere una captura simultánea de las variables (por ejemplo, la medida de un desfase entre dos señales). En este caso, se recurre a un sistema de medida con conversión en paralelo, como el mostrado en la figura 1.15, en el que cada canal de entrada dispone de un convertidor A/D independiente.

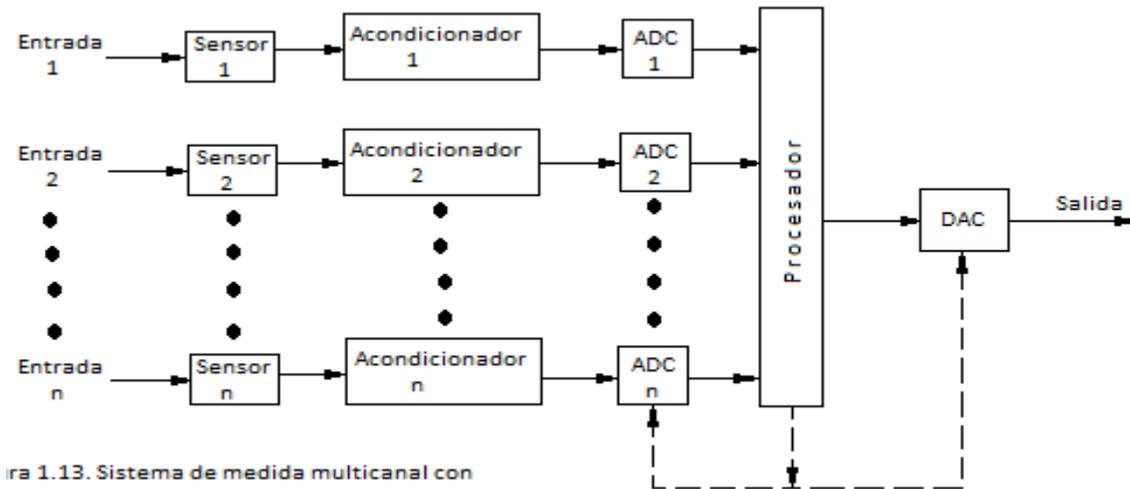


Figura 1.13. Sistema de medida multicanal con un ADC por canal.

FIGURA 1.15. SISTEMA DE MEDIDA MULTICANAL CON UN ADC POR CANAL.

1.4 FORMAS DE INSTRUMENTAR.

ARQUITECTURAS DE LOS SISTEMAS DE INSTRUMENTACIÓN.

En los procesos tecnológicos son muchas las variables de las que hay que tener información oportuna para mantenerles en un punto de operación determinado. En tales casos, el sistema de medida y control puede adoptar dos arquitecturas básicas:

Arquitectura centralizada.

La figura 1.16 presenta esta arquitectura que se caracteriza por realizar la ejecución del algoritmo de medición y control en un núcleo inteligente, es decir, centralizadamente. Generalmente, se emplea en procesos de pocas variables y con distancias cortas entre los sensores y el núcleo inteligente. Sus desventajas son la necesidad de mucho cable generalmente de alto coste y las elevadas exigencias sobre el sistema de acondicionamiento de señales debido al ruido eléctrico presente.

Arquitectura distribuida.

La figura 1.17 presenta el esquema general de esta arquitectura. Es utilizada cuando el número de señales del proceso es muy elevado, o su dispersión geográfica es muy grande y/o cuando las exigencias dinámicas de las variables medidas son altas. Se caracteriza por poseer varios núcleos inteligentes (1, 2, 3, ...N), sobre la base de microprocesadores, que se comunican con otros sistemas a través de un bus de proceso digital (generalmente a dos hilos), por el que fluye la información en forma serie y con alta inmunidad al ruido.

El núcleo inteligente de segundo nivel (M) realiza las funciones de organización de la transferencia de información y ejecuta parcial o totalmente el algoritmo de medición y control. Pueden existir varios de estos sistemas que intercambien información digital con mayor rapidez e inmunidad al ruido a través de una estructura en bus. A diferencia de la arquitectura de estrella, en esta estructura se realiza el procesamiento de la información **descentralizadamente**. El núcleo ejecutor del algoritmo de medición y control posee entradas y salidas digitales, a través de los buses de proceso y de campo, respectivamente. Al propio tiempo, cada terminal de medición (1, 2, 3, ...N) se encuentra muy próximo a los sensores o en el propio sensor (sensores inteligentes o *smart sensors*) y en ellas se realiza el procedimiento primario de la información (adquisición, filtrado, validación, linealización, calibración, etc.).

FIGURA 1.16. ARQUITECTURA CENTRALIZADA.

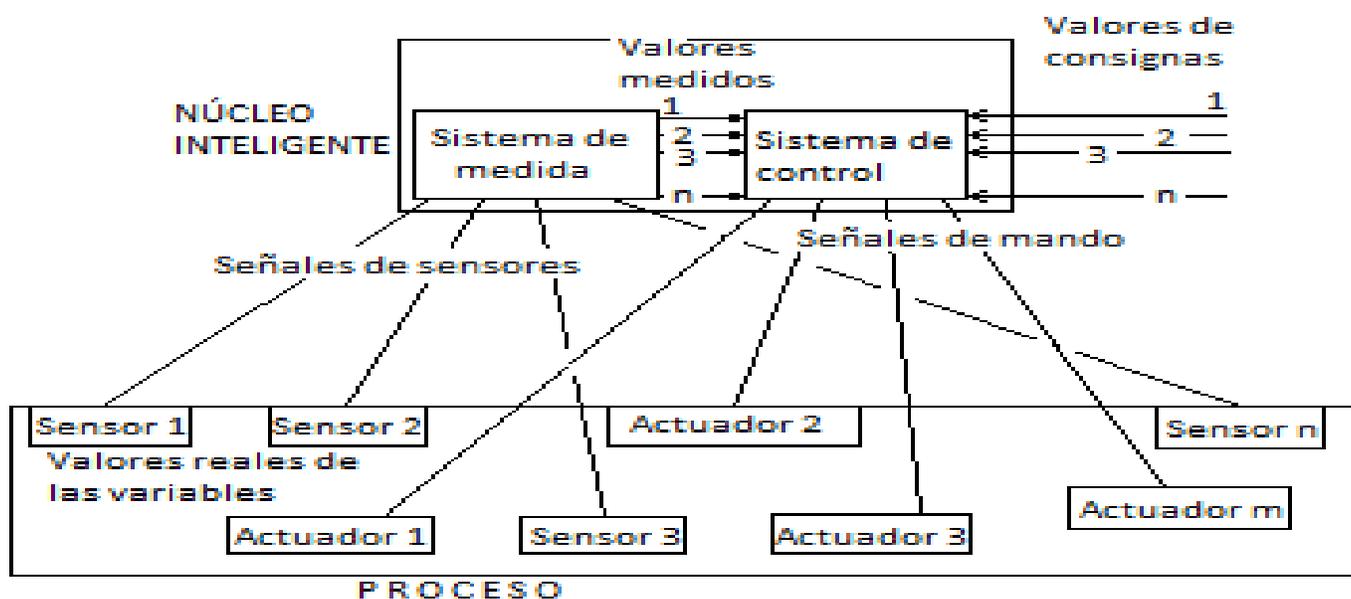
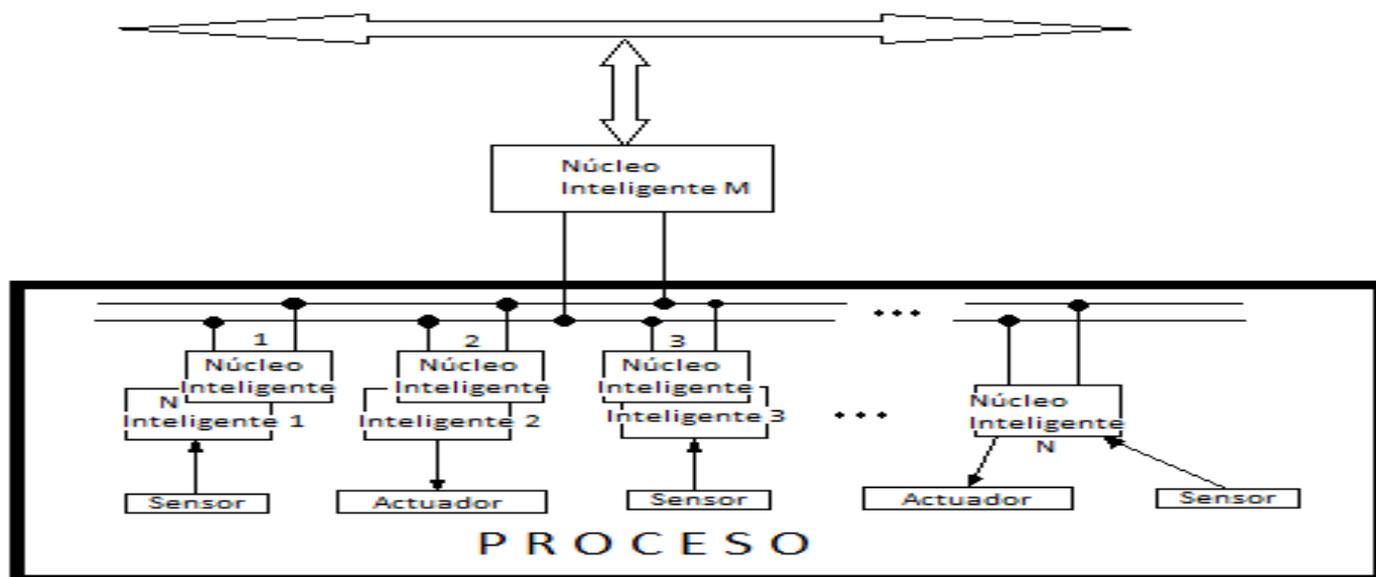


FIGURA 1.17. ARQUITECTURA DISTRIBUIDA.



1.5 CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS.

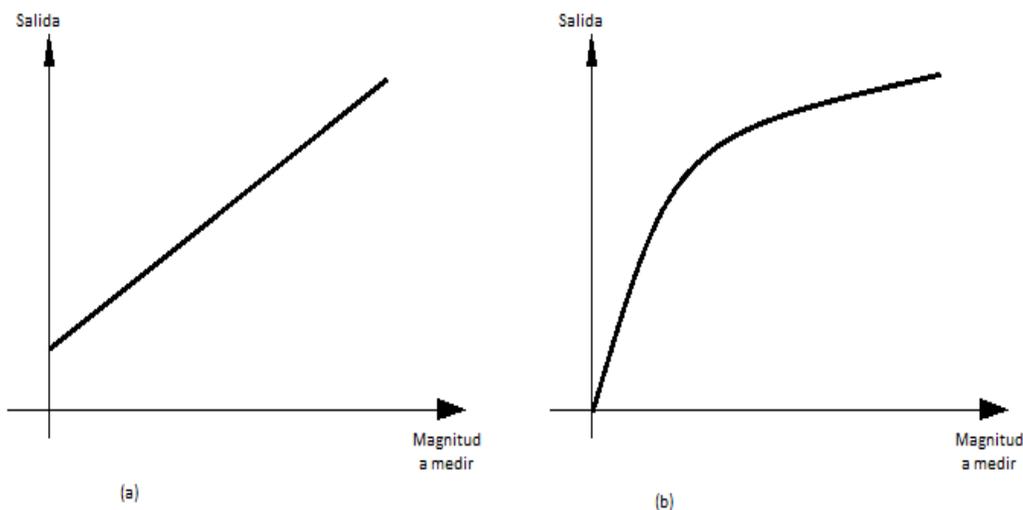
El comportamiento de un sensor o de un instrumento de medida se puede definir, en general, mediante la **FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA**, que indica tanto el comportamiento en régimen estático como dinámico. El primero corresponde a la relación entre la entrada y la salida cuando la entrada es constante o cuando ha transcurrido un tiempo suficiente para que la salida haya alcanzado el valor final o régimen permanente. El segundo indica la evolución del sistema hasta que la salida alcanza el valor final ante una variación en la entrada.

Una función de transferencia que recogiese con rigurosidad ambos comportamientos resultaría tremendamente compleja por lo que, en la práctica, suelen indicarse por separado mediante una serie de parámetros.

Curva de Calibración (*Static Transfer Function*).

La curva de calibración es la relación entre la entrada al sensor o sistema y su salida en régimen estático (figura 1.18).

FIGURA 1.18. EJEMPLOS DE CURVA DE CALIBRACIÓN. A) CURVA DE CALIBRACIÓN LINEAL. B) CURVA DE CALIBRACIÓN NO LINEAL.



Para definir la curva adecuadamente se necesita como mínimo indicar su forma y sus límites. Estos últimos se especifican con algunos de los siguientes parámetros (figura 1.19):

- Campo de medida.** Conjunto de valores comprendidos entre los límites superior e inferior entre los que puede efectuarse la medida. Por ejemplo, si se dispone de un termómetro diseñado para medir entre -20 y 60°C , el campo de medida es de $-20^{\circ}\text{C}/60^{\circ}\text{C}$. También se conoce como rango dinámico aunque este término se emplea más frecuentemente para indicar la diferencia entre el límite superior e inferior expresada en decibelios.
- Alcance, fondo de escala.** Es la diferencia entre los límites superior e inferior de medida. Por ejemplo, en el caso del termómetro mencionado anteriormente el alcance es de 80°C . También se conoce con el término *fondo de escala*. Conviene no confundir este término con el límite superior de medida, que es de 60°C , aunque en muchos sistemas el alcance y el límite superior pueden coincidir.
- Salida a fondo de escala.** Es la diferencia entre las salidas para los extremos del campo de medida.

En cuanto a la forma de la curva de calibración, hay que tener en cuenta que muchos de los sensores de mayor interés presentan una respuesta que puede aproximarse a una línea recta. Por tanto, la curva de calibración puede definirse fácilmente mediante dos puntos o mediante un punto y la pendiente, siendo esta última definición mucho más habitual. No obstante, cuando la recta pasa por el origen sólo es necesario especificar la pendiente. Además, es necesario indicar, de algún modo, el error cometido en la aproximación, es decir, la diferencia entre la curva real y la curva linealizada. Por ello, para definir la curva linealizada se emplean los siguientes términos:

- Sensibilidad.** Es la pendiente de la curva de calibración.
- No linealidad.** Es la máxima desviación de la curva de calibración con respecto a la línea recta por la que se ha aproximado. Habitualmente se suele expresar en % con respecto al alcance y suele denominarse como error de linealidad e incluso como linealidad. Téngase en cuenta que este error depende de la aproximación que se haya realizado. Así, por ejemplo, en la figura 1.20 se muestra la misma curva de calibración linealizada por dos formas diferentes siendo el error también diferente.

FIGURA 1.19 PARAMETROS PERTENECIENTES A LA CURVA DE CALIBRACIÓN.

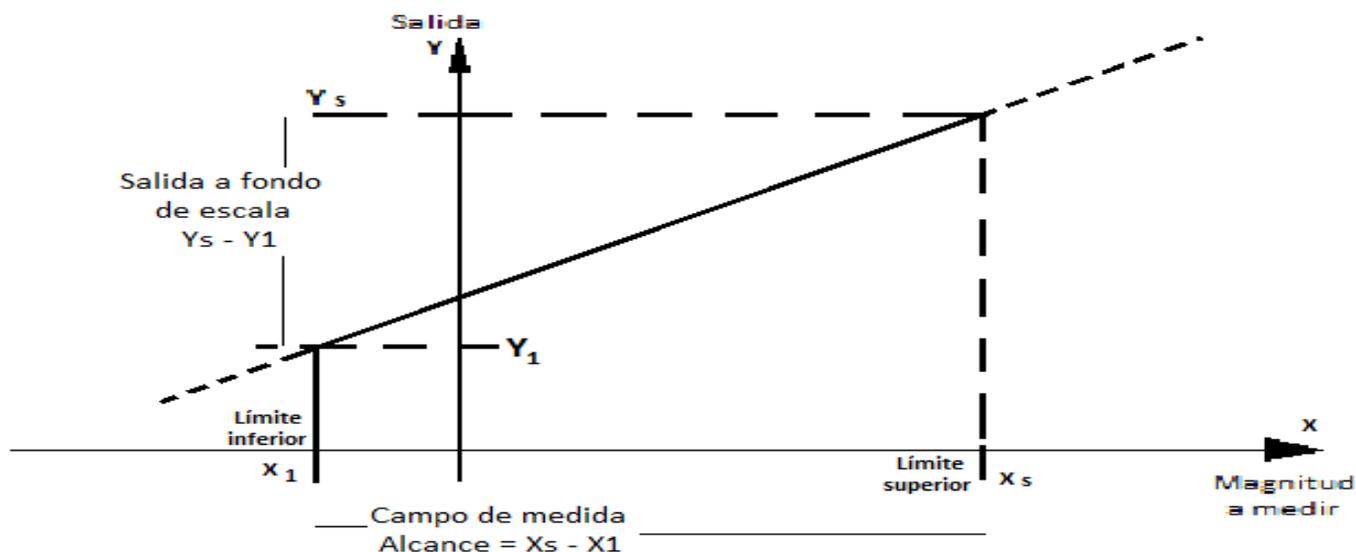
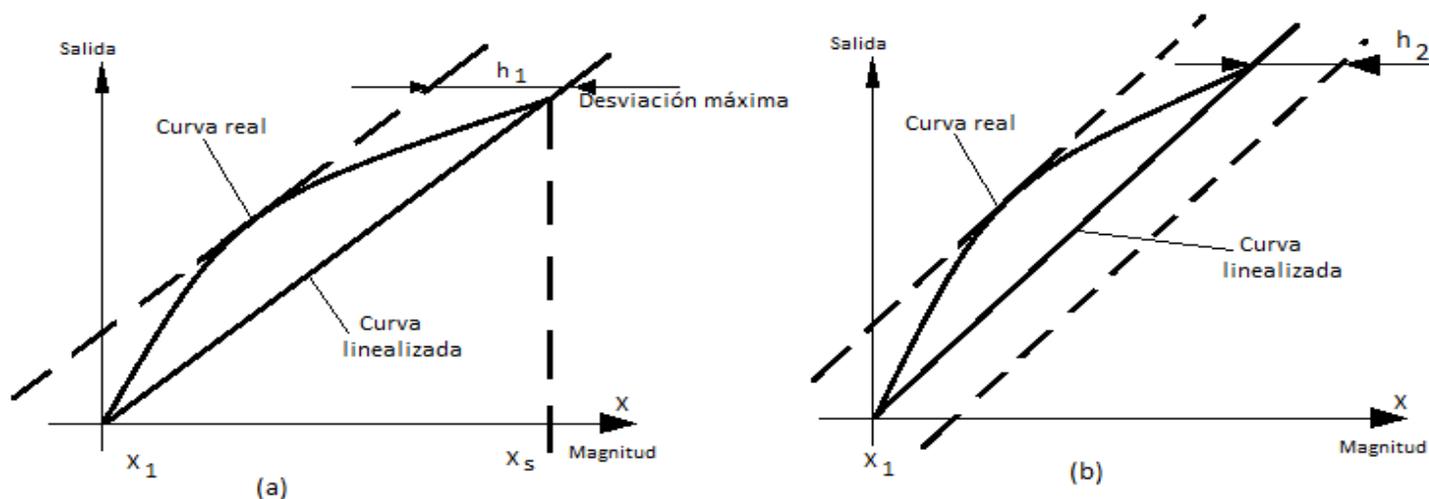


FIGURA 1.20 COMPARACIÓN DE DOS FORMAS DE APROXIMAR A LA CURVA DE CALIBRACIÓN.



Para las curvas de calibración que no son lineales, la sensibilidad resulta insuficiente para definir las puesto que es variable a lo largo de la misma; no obstante, suele resultar de interés conocer las sensibilidades máxima y mínima. Generalmente las curvas se definen mediante una tabla indicando para cada entrada la correspondiente salida. También resulta muy habitual aproximar la salida a alguna función matemática, siendo necesario especificar, de nuevo, el error cometido en tal aproximación.

En algunos casos, la definición de la curva de calibración puede requerir algún parámetro adicional, entre los que cabe destacar los siguientes:

- a) **Zona muerta.** Es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación. También se define como la región de la curva de calibración que presente una sensibilidad nula. Por ejemplo, en los potenciómetros angulares de una vuelta sin fin, la variación de la resistencia entre el cursor y uno de los terminales con el ángulo de giro es, generalmente, lineal; pero existen ciertos ángulos de giro que no producen variación alguna (figura 1.21).
- b) **Histéresis.** Es la diferencia en la medida dependiendo del sentido en el que se ha alcanzado (figura 1.22). Por ejemplo, si se dispone de una báscula cuyo campo de medida es 0-100 kg y se va incrementando el peso sobre la misma gradualmente hasta llegar al máximo, es probable que la indicación del peso no sea la misma que si se va disminuyendo desde el máximo. Si ante 50 kg, en el primer caso marca 49 kg y en el segundo 51 kg, la histéresis es de 2 kg o bien, expresada respecto del fondo de escala, es del 2%.
- c) **Deriva.** Es la variación de algún aspecto de la curva de calibración con respecto a algún parámetro ambiental (temperatura, humedad, etc., siempre que el propio parámetro no sea el objeto de la medida) o con respecto al tiempo (ver figura 1.23). Para caracterizar los sistemas suele ser muy habitual indicar la deriva en algún punto significativo como, por ejemplo, el que corresponde al cero. Normalmente se expresa en % sobre el fondo de escala de salida.
- d) **Saturación.** Es el nivel de entrada a partir del cual la sensibilidad disminuye de forma significativa.
- e) **Resolución.** En algunos sensores e instrumentos de medida, una variación continua de la señal de entrada no da lugar a una variación continua en la salida, más bien parece tener una forma escalonada. La resolución se define como el incremento mínimo de la variable de entrada que ofrece un cambio medible a la salida (figura 1.24).

FIGURA 1.21. DEFINICIÓN DE ZONA MUERTA.

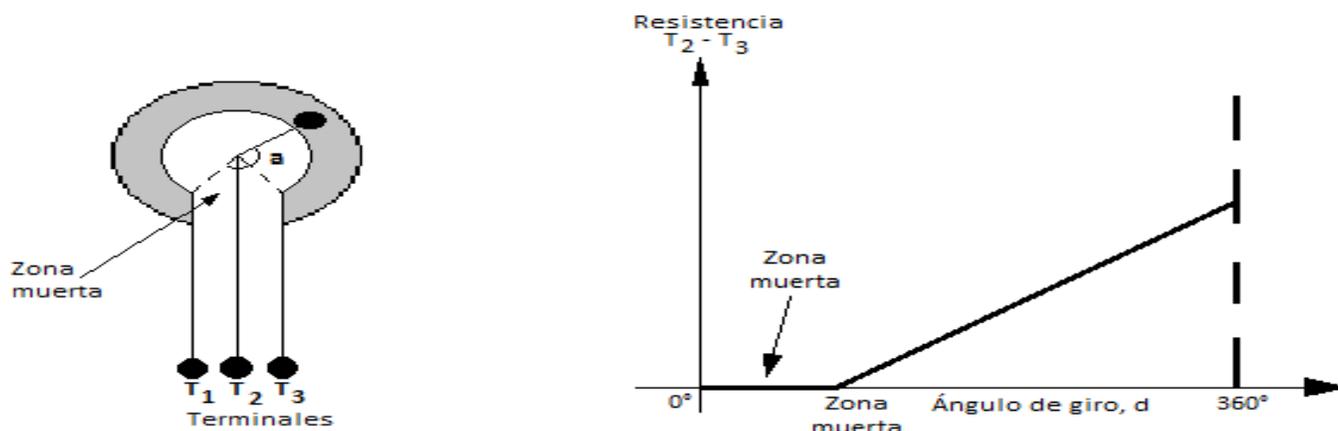


FIGURA 1.22 DEFINICIÓN DE HISTÉRESIS.

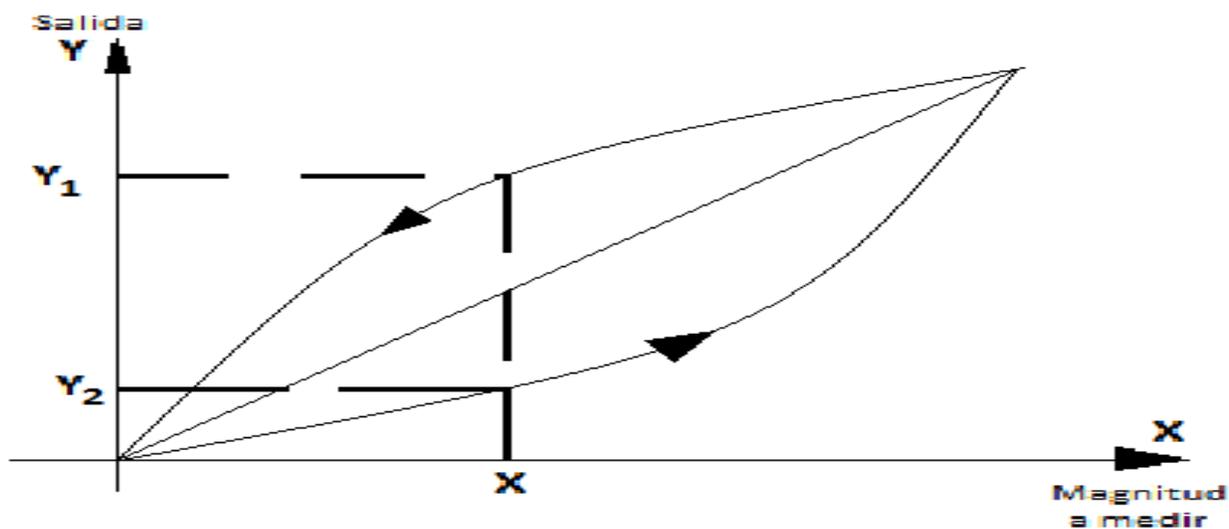


FIGURA 1.23 DEFINICIÓN DE DERIVA.

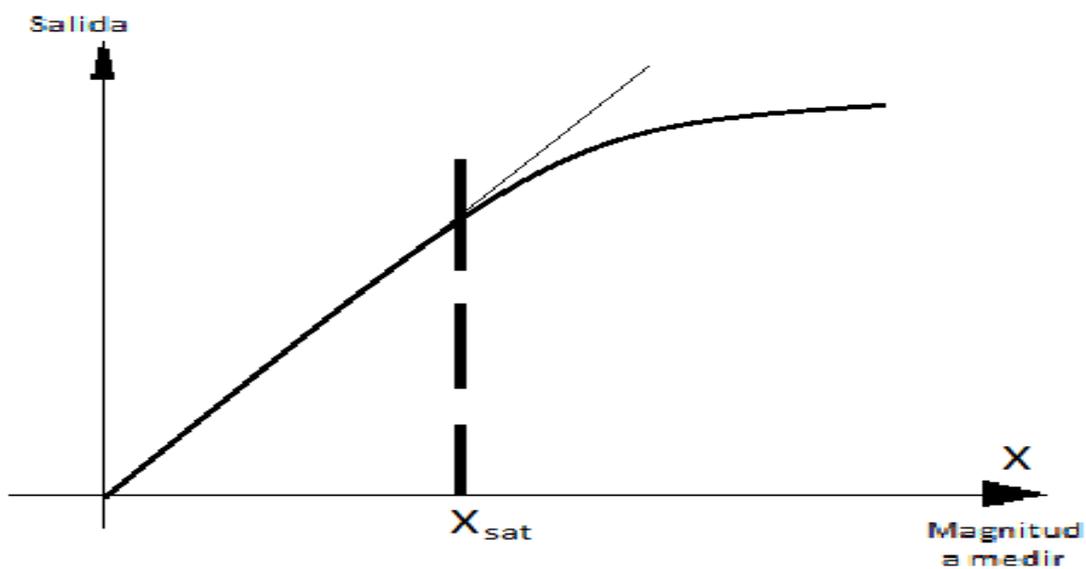
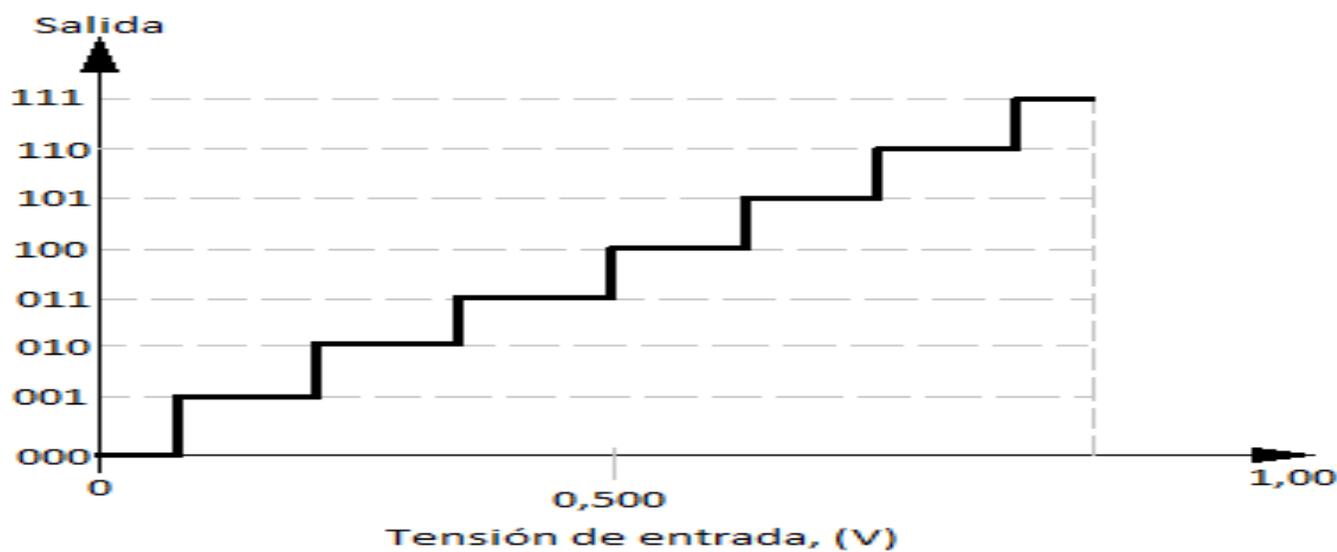


FIGURA 1.24. DEFINICIÓN DE RESOLUCIÓN.



1.6 ERRORES: EXACTITUD, VERACIDAD Y PRECISIÓN.

Un principio básico de todo sistema de instrumentación electrónica es el de medir una magnitud con el menor error posible. Siempre existe un grado de incertidumbre puesto que es imposible realizar una medición sin modificar en mayor o menor grado aquello que se mide (según el principio de incertidumbre de Heisenberg). Por suerte, no es necesario conocer las magnitudes con exactitud absoluta. Vivimos en un mundo de aproximaciones (sí pudiéramos cuantificar nuestro peso con infinitos decimales, nos moriríamos antes de poder leerlo) y nos resulta suficiente con conocer las magnitudes con un cierto grado de error.

Los términos más elementales para cuantificar el error son el error absoluto y el error relativo:

- a) **Error absoluto.** Diferencia entre el valor medido y el valor exacto en valor absoluto.
- b) **Error relativo.** Error absoluto dividido entre el valor exacto.

Por otra parte, los errores se suelen clasificar en sistemáticos y aleatorios. Los primeros se mantienen constantes en valor absoluto y signo después de medidas repetidas por lo que pueden evitarse, mientras que los segundos permanecen aún después de haber corregido los primeros. Ambos son, en principio, independientes por lo que si el error sistemático en la medida de una magnitud x es $\pm k_1 x$ y el aleatorio es $\pm k_2 x$, el error total es:

$$e = \sqrt{(k_1 x)^2 + (k_2 x)^2}$$

Una mejor definición del comportamiento del sistema en lo referente al error exige cuantificar el error de forma que pueda detectarse el origen del mismo. Así, se definen los siguientes términos para cuantificar el error:

- a) **Veracidad.** Es el grado de concordancia entre el valor medio obtenido de una gran serie de resultados y el valor verdadero o el aceptado como referencia.
- b) **Precisión.** Es el grado de concordancia entre los resultados.
- c) **Exactitud.** Este término se utiliza para referirse conjuntamente a la veracidad y a la precisión, es decir, a la correspondencia de los resultados entre sí y, además, al valor verdadero.

El término general para definir la variabilidad entre mediciones repetidas es la precisión. Existen diferentes factores que pueden contribuir a la variabilidad de un método de medición, entre ellos, los siguientes: el operador que realiza la medición; los equipos; la calibración de los equipos; el ambiente (temperatura, humedad, etc.); el intervalo temporal entre las mediciones.

La precisión se cuantifica a partir de dos términos denominados **repetibilidad** y **reproducibilidad**. La medición de la repetibilidad se realiza manteniendo constantes los factores anteriores mientras que, bajo condiciones de reproducibilidad, se varían.

La cuantificación de la exactitud, precisión, veracidad, repetibilidad y reproducibilidad se obtiene y se expresa mediante procedimientos y términos estadísticos. Sin embargo, los fabricantes de instrumentos de medida suelen especificar estos aspectos (principalmente la exactitud) en % sobre el fondo de escala de entrada o de salida, para que sea un valor fácilmente comprensible y manejable por el personal poco familiarizado con estas cuestiones.

1.7 CALIBRACIÓN.

La calibración de un sistema consiste en establecer, con la mayor exactitud posible, la correspondencia entre las indicaciones de un instrumento de medida y los valores de la magnitud que se mide con él.

Los métodos de calibración más sencillos son la calibración a un punto y la calibración del cero y de la sensibilidad.

Calibración a un punto.

Consiste en actuar sobre el sistema de medida de forma que para un punto concreto la salida sea lo más exacta posible.

Calibración del cero y de la sensibilidad.

Para ajustar perfectamente una curva de calibración lineal se necesitarían ajustar dos puntos o un punto y la pendiente o sensibilidad. Muchos instrumentos de medida incorporan esta posibilidad de calibración aunque no siempre sea accesible por el usuario mediante mandos externos, aunque sí por el fabricante.

1.8 CONTROLADORES

Como ya se ha dicho, el *controlador* es el dispositivo responsable de elaborar la señal correctora que constantemente es enviada al elemento final de regulación del proceso, con el fin último de *alcanzar, restablecer o mantener* las condiciones de regulación deseadas; es decir, hacer que la medida se mantenga en un valor lo más próximo al punto de consigna. Esta señal correctora, o salida del controlador, es función de la *señal de error*, llamada también *desviación*, (la diferencia entre consigna y medida), y tiene o puede tener en cuenta su *signo, magnitud, duración y tendencia*.

Los diversos modos de actuación que determinan la salida del controlador se llaman *modos de regulación* y son debidos, a su vez, a la incorporación combinada de diferentes *acciones de control*.

Aquí se analizarán exclusivamente aquellos modos de regulación que contienen acciones de control basadas en funciones lineales, y consideraremos equivalentes la salida del controlador y la posición de la válvula.

1.8.1 CONTROLADOR PROPORCIONAL.

El modo proporcional es aquel en que el elemento final de regulación efectúa, con referencia a una posición inicial correspondiente a una señal de error nula, un movimiento o carrera proporcional a la magnitud de la desviación. El factor de proporcionalidad es ajustable. Con ello hemos definido la *acción proporcional*.

Con relación a la acción proporcional, debemos distinguir los siguientes conceptos y definiciones:

Banda Proporcional (BP).

Es el tanto por ciento de escala que la medida debe recorrer, para mover el elemento final de regulación (salida del controlador) de una posición extrema a la otra (la totalidad de la carrera). Nótese que hablar de variaciones en la medida equivale a hablar de variaciones de la señal de error de la misma magnitud, puesto que se asume constante el punto de consigna.

Con una banda proporcional estrecha sólo se requiere un pequeño cambio de la medida para que la válvula efectúe la totalidad de su carrera, mientras que con una banda ancha un gran cambio de la medida producirá un pequeño movimiento en la posición de la válvula. Con una banda proporcional del 100% los cambios en la válvula serán de la misma magnitud que los de la medida.

En la figura 1.25 se representa la relación entre la medida y la posición de la válvula para diferentes valores de la banda proporcional. En este gráfico se asume que el punto de consigna se halla en el 50% de la escala, y que para una desviación nula la posición de la válvula sería también del 50%.

Nótese que con una banda proporcional superior al 100% ya no es posible que la válvula efectúe el recorrido completo.

Ganancia.

Es el concepto inverso del de banda proporcional. Se define como la relación entre variación de salida del controlador (movimiento de la válvula) y la variación de la entrada que la ha causado (medida o desviación).

Desviación permanente (Offset).

Es obvio que cualquier cambio de carga en el proceso requiere una nueva posición de la válvula, para compensarlo por mediación de la variable manipulada. Pero, como se ha visto, es preciso cierto cambio en el valor de la medida y, por tanto, en la desviación, para obtener una nueva posición en la válvula (a menos que se modifique el punto de consigna). Esto significa que, si partíamos de una desviación nula, entonces en las nuevas condiciones de equilibrio necesariamente existirá una *desviación residual o permanente*. El modo de regulación proporcional puede producir una acción correctora exacta (sin desviación permanente), solamente en una condición específica de carga; en las demás persistirá una desviación.

Reajuste manual.

Sí en una regulación proporcional se pretende corregir la desviación permanente y llevar la medida (o más concretamente, la variable controlada) al valor exacto que se desea, deberá reajustarse manualmente el punto de consigna, desplazándolo en dirección contraria a la medida, una cantidad que dependerá, entre otras cosas, de la ganancia del lazo. Con ello se podrá hacer que la medida se sitúe en el valor realmente deseado.

Cabe también intervenir en el sistema de equilibrio estático del controlador, ya sea electrónico o neumático (operación llamada *alineación*), provocando un desplazamiento en la recta representativa de la banda proporcional, con lo que se modifica el valor de salida correspondiente a una desviación nula. Obviamente, esta alteración se hace extensiva para cualquier valor de desviación. Con ello se consigue posicionar la válvula en la apertura precisa, para que satisfaga unas condiciones particulares del proceso, con una desviación nula.

Hay que insistir, sin embargo, que estos reajustes son válidos solamente para unas determinadas condiciones de carga en el proceso.

Ecuación del controlador.

La salida del controlador (posición de la válvula) en función de la señal de entrada (medida), vendrá dada por

$$y = \frac{100}{B} (c - m) + N$$

O bien

$$y = G (c - m) + N$$

Donde

y = Salida del controlador.

c = Punto de consigna.

m = Señal de medida.

B= Banda proporcional.

G = Ganancia = $100/B$.

N = Constante (posición de la válvula para desviación nula).

La cantidad encerrada entre paréntesis, $c-m$, es precisamente la señal de error o desviación.

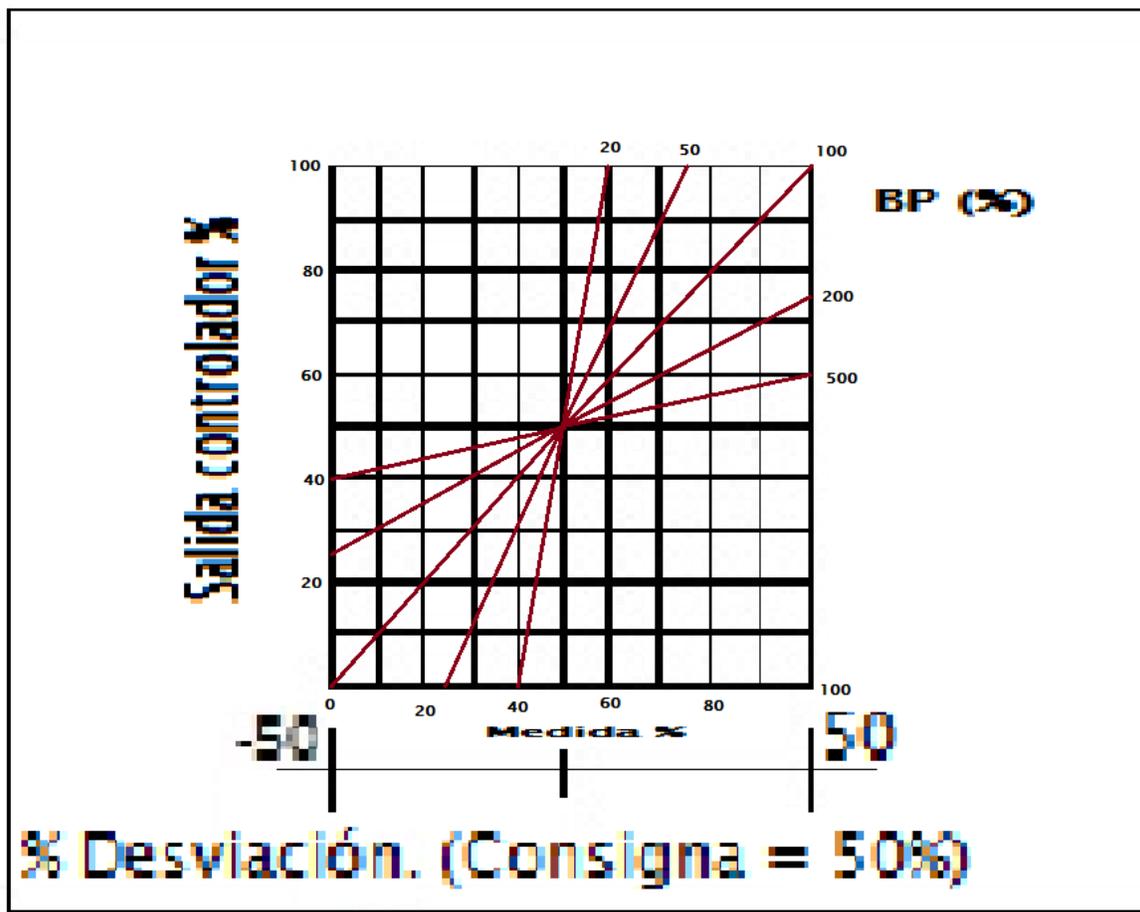


FIGURA 1.25. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA BANDA PROPORCIONAL.

El lector se habrá percatado de que el signo de la señal correctora debe ser el adecuado para que se produzca el movimiento de la válvula en la dirección apropiada para disminuir o anular la desviación. Esto dependerá del tipo de válvula (acción directa o inversa) y del tipo de proceso (por ejemplo, el aumento de un caudal puede calentar o enfriar, según el caso). La adecuación del signo se consigue gracias a que la ganancia del controlador puede adoptar tanto valores positivos como negativos. Este hecho suele designarse en la práctica como *acción inversa* o *acción directa*. Se considera acción directa aquella en que un aumento en la medida provoca un aumento en la salida del controlador. Si asumimos que la señal de error generada por el comparador es $c - m$ (la medida actúa restando de la consigna), la acción directa implica una ganancia negativa en el controlador. En todo caso, el producto de todas las ganancias del lazo debe ser positivo (para que la realimentación sea negativa).

El fenómeno de la desviación permanente debida a un cambio de carga, y su compensación por reajuste manual, ya sea mediante la modificación del punto de consigna, o bien por la intervención en el sistema de equilibrio del controlador, puede verse en la figura 1.26. Se han representado, concatenadas por las señales, en un bucle cerrado, las curvas características de respuesta del controlador, las del conjunto formado por la válvula y el proceso, las del medidor y las del comparador (generador de señal de error o desviación). Para mayor claridad, se han supuesto todos los componentes lineales.

En línea fina de trazo continuo se muestra una hipotética situación de equilibrio, en la que todas las variables y sus señales, incluido el punto de consigna, están en el 50%, siendo nula la desviación. En un momento dado se introduce un cambio de carga en el proceso, con lo que su curva característica se desplaza y pasa a ser la que se dibuja a trazos gruesos. Nótese que ahora, con la misma señal de salida del controlador (posición de válvula), se tendría un valor menor de la variable controlada. La única situación de equilibrio posible es la representada por las líneas de puntos. Observamos que la variable controlada ha sufrido un decremento que se traduce en una desviación permanente, la cual provoca un incremento en la posición de la válvula, compensando parcialmente el efecto del cambio de carga. El reajuste manual podría ser efectuado aumentando el punto de consigna, según la característica dibujada a trazos gruesos, en donde la nueva situación de equilibrio es la representada en línea fina de trazos. Ahora la salida del controlador (posición de la válvula) se ha incrementado y la variable controlada retorna al verdadero valor deseado (50%), con lo que la desviación real (práctica) es nula; si bien la desviación aparente (consigna – medida) se ha hecho de signo contrario.

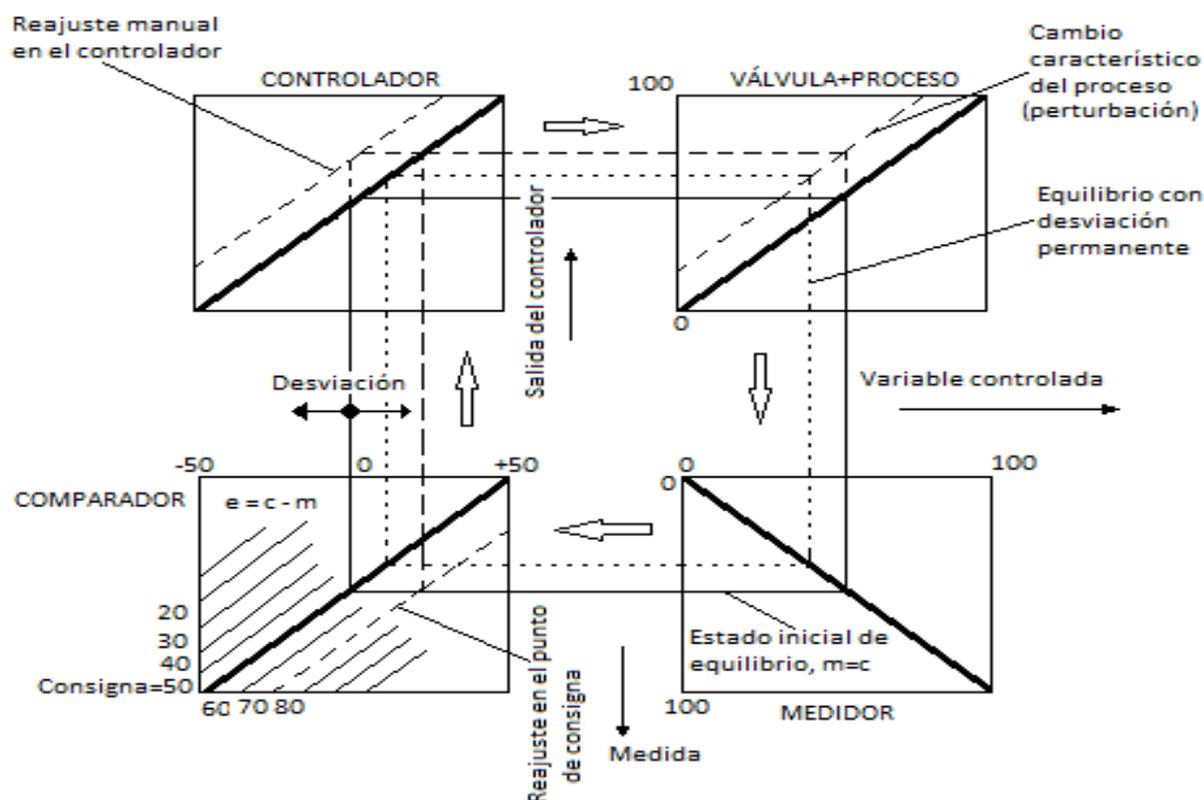


FIGURA 1.26. REAJUSTE MANUAL PARA COMPENSAR UN CAMBIO DE CARGA.

La segunda posibilidad, sería desplazar la curva de respuesta del controlador, según la línea de trazos. La salida del controlador aumenta y la variable controlada retorna al valor deseado, con una desviación nula. Puede parecer una buena solución, y teóricamente lo es; pero tener que “retocar” el controlador cada vez que acontece un cambio de carga o que se requiere un cambio en el punto de consigna, no es precisamente recomendable desde un punto de vista práctico.

Téngase en cuenta que si partiendo de unas condiciones iniciales de equilibrio, con desviación nula, se efectúa un cambio en el punto de consigna, surge igualmente el fenómeno de la desviación permanente.

1.8.2 CONTROLADOR INTEGRAL.

A este modo de regulación también se le llama *flotante de velocidad proporcional*. El controlador hace que el elemento final de control se mueva a una velocidad que es proporcional a la señal de error. En otras palabras, cuanto mayor es la desviación, mayor es la velocidad de desplazamiento de la válvula. El factor de proporcionalidad es ajustable, con lo que la válvula puede moverse a distinta velocidad, para una misma señal de error.

El hecho de primordial importancia en este tipo de regulación, es que mientras haya señal de error persistirá una acción correctora, tanto menos enérgica cuanto más se vaya reduciendo dicha señal. La señal correctora, pues, responde tanto a la magnitud como a la duración de la desviación. De este modo, para cualquier perturbación, la acción correctora persiste hasta haber producido la compensación necesaria y precisa para restablecer en el proceso las condiciones de equilibrio, anulando totalmente la desviación.

La regulación integral tiene el inconveniente de que es poco enérgica en los instantes que siguen a la aparición brusca de una desviación, ya que su efecto es paulatino. Nótese el contraste con la regulación proporcional, en la que permanece una desviación permanente, pero, sin embargo, presenta una respuesta enérgica e instantánea desde el primer momento en que surge un cambio en la desviación.

Ecuación del controlador.

Se determina a partir de la definición que se ha dado:

$$v = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{T_i} (c - m) = \frac{1}{T_i} e$$

Donde

y = Salida del controlador.

c = Punto de consigna.

m = Señal de medida.

$e = c - m$ = Error o desviación.

$v = dy/dt$ = Velocidad del cambio de la salida.

T_i = Tiempo de integración (factor de proporcionalidad inversa).

De la ecuación anterior, por integración se obtiene

$$y = \frac{1}{T_i} \int e dt + K$$

En la que K es la constante de integración, equivalente en este caso a la posición inicial de la válvula (valor de y para $t = 0$).

Otra forma más idónea de representar esta ecuación será

$$y = y_0 + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt$$

En donde $y_0 = K$, es decir, el valor de la salida inicial para $t = 0$, y el término que contiene la integral es la variación de la señal de salida producida en el tiempo t .

Queda demostrado que se trata de una *acción integral*. El factor T_i puede interpretarse como el *tiempo necesario para que la salida del controlador efectúe un cambio de igual magnitud al de la desviación* (en el supuesto que esta se mantuviera constante). O, dicho de otro modo, es la relación entre la señal de error y la velocidad de desplazamiento de la válvula, expresadas ambas ya sea como fracción unitaria o en tanto por ciento.

En efecto, resolviendo la integral anterior para un valor de e constante, obtenemos

$$y = y_0 + \frac{1}{T_i} e t$$

$$\Delta y = y - y_0 = \frac{1}{T_i} e t$$

Y, por tanto,

$$T_i = \frac{e}{\Delta y} t$$

En donde si asumimos la condición $\Delta y = e$; es decir, una variación en la salida igual a la señal de error, entonces confirmamos la interpretación que se había efectuado:

$$T_i = t |_{\Delta y = e}$$

Asimismo, de la primera ecuación obtenemos directamente $T_i = e/v$, de donde

$$\frac{1}{T_i} = \frac{v}{e}$$

Y si ahora hacemos $e = 1$; esto es, una señal de error unitaria, obtendremos

$$\frac{1}{T_i} = v |_{e=1}$$

Que permite la siguiente interpretación:

El factor $1 / T_i$, recíproco del tiempo de integración, es la *velocidad de cambio de la salida del controlador cuando la señal de error vale la unidad*; o, lo que es lo mismo, es el factor de proporcionalidad de la velocidad de movimiento de la válvula, con relación a la desviación.

Transmitancia operacional.

La transmitancia de un *controlador integral* será

$$\frac{Y}{E} = \frac{1}{T_i s}$$

Esto es

$$Y = \frac{E}{T_i s}$$

Nótese que en un controlador integral no se precisa hablar de ganancia, dado que esta queda englobada en el factor *tiempo de integración*, T_i . En efecto, si aplicamos una ganancia K a la función de transferencia de este controlador, tendremos la siguiente expresión:

$$K \frac{1}{T_i s} = \frac{1}{\frac{T_i}{K} s} = \frac{1}{T_i' s}$$

Quedando una ecuación semejante a la original, en la que ahora se tiene un *tiempo de integración efectivo* T_i' , definido como

$$T_i' = \frac{T_i}{K}$$

Lo cual resulta evidente si se tiene en cuenta que el efecto multiplicador de un factor de ganancia K , en la respuesta debida a una acción integral, es equivalente al que se obtiene dividiendo el tiempo integral por K , que es tanto como decir que su acción se hace K veces más enérgica. La velocidad de la respuesta, frente a un cambio en escalón de magnitud e , ahora sería

$$v = \frac{e}{T_i'} = \frac{e}{T_i/K} = K \frac{e}{T_i}$$

1.8.3 CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL (PI).

Este modo de regulación reúne las características de los modos proporcional e integral, aprovechando las ventajas y obviando los inconvenientes de ambos modos. Contendrá, por tanto, la acción proporcional y la integral.

Distinguiremos los siguientes conceptos:

Acción integral (Reset).

Esta acción correctora, proporcionada por el modo de regulación flotante de velocidad proporcional, se superpone a la acción proporcional.

Ahora ya no será necesaria la operación manual de reajuste, después de un cambio de carga o de un cambio en el punto de consigna, puesto que la *acción integral* la efectuará de forma automática. De aquí que a esta acción se la denomine también *reajuste automático*.

Tendremos, pues, que en los instantes que siguen a un cambio de carga o de punto de consigna, la *acción proporcional* facilitará inmediatamente un cambio en la salida del controlador que tenderá de manera aproximada a ajustar el proceso. Finalmente, la *acción integral* proporcionará paulatinamente la corrección suplementaria exacta hasta anular la desviación. Una vez que el proceso recupera el equilibrio y se estabiliza, la válvula habrá adoptado la posición necesaria y precisa para satisfacer la demanda debida a los nuevos requisitos impuestos por el cambio de carga. La curva característica del controlador se habrá desplazado, tal como veíamos en la figura 4.48, pero ahora de manera automática, hasta alcanzar las condiciones finales de equilibrio con desviación nula.

Velocidad de reajuste. Repeticiones por minuto.

La acción integral hemos dicho que proporciona el reajuste automático como complemento de la acción proporcional. La velocidad a la que la válvula se mueve, por efecto de la acción integral, en respuesta a una desviación, se llama *velocidad de reajuste* o *velocidad integral*.

Esta velocidad ha sido tradicionalmente expresada en *repeticiones por minuto*, y significa, en el supuesto de la aparición repentina de una desviación que se mantuviera constante, el número de veces por minuto que el movimiento inicial de la válvula, debido al efecto de la acción proporcional, es *repetido* por la acción integral.

Tiempo Integral.

Es el valor recíproco de las repeticiones por minuto. Puede definirse como el tiempo en minutos que tarda la acción integral en repetir el movimiento de la válvula debido a la acción proporcional, frente a un cambio en escalón de la desviación, si esta se mantuviera constante. Los valores de la velocidad de reajuste, o del tiempo integral, son independientes del valor de la desviación. A mayor desviación corresponden unos efectos igualmente mayores de las correcciones debidas a las acciones proporcional e integral, manteniéndose la relación de proporcionalidad entre los tres valores.

Ecuación del controlador.

La respuesta global es la suma algebraica de las respuestas de cada una de las dos acciones individuales

$$y = G \left(e + \frac{1}{T_i} \int e dt + K \right)$$

En la que

T_i = tiempo integral;

$1 / T_i = \text{velocidad de reajuste}$

y los demás símbolos ya han sido definidos previamente. Nótese, sin embargo, que hemos trasvasado la constante K dentro del corchete, lo que implica haber dividido su valor original por G .

El término de la acción integral viene multiplicado por la ganancia, lo que significa que el efecto integral es proporcional a la ganancia y a la velocidad de reajuste (y, obviamente, a la integral del error).

Sí queremos expresar la velocidad de movimiento de la válvula, más bien que su posición, tendremos, diferenciando la ecuación anterior

$$v = \frac{dy}{dt} = G \left(\frac{de}{dt} + \frac{1}{T_i} e \right)$$

en donde podemos comprobar que la velocidad de la válvula, debida a la acción integral, es proporcional a la ganancia, a la velocidad de reajuste y a la desviación, tal como se había enunciado. Por el contrario, sí la desviación permanece constante, la acción proporcional no contribuye en el movimiento de la válvula. En efecto, sí el proceso no reacciona, es decir, sí la medida m se mantiene constante, a pesar de las correcciones que recibe la válvula, entonces $de/dt = 0$, y la ecuación anterior queda

$$v = G \frac{1}{T_i} e$$

y, por lo tanto, la válvula se mueve a velocidad constante hasta alcanzar su límite o tope mecánico.

1.8.4 CONTROLADOR PROPORCIONAL-DERIVATIVO (PD)

A la forma de regulación proporcional, con o sin acción integral, se le puede añadir una acción llamada *derivativa*, que, como se verá a continuación, responde solamente a la magnitud de la velocidad de cambio de la desviación, de tal manera que se opone a ella.

Acción derivativa (Rate).

Es aquella en la que la posición del elemento final de regulación adopta, con relación a una posición original correspondiente a una desviación constante, un desplazamiento instantáneo proporcional a la velocidad de cambio de la desviación; esto es, a la pendiente de la señal de medida.

Es decir, que suponiendo el punto de consigna constante, el desplazamiento de la válvula es proporcional a la primera derivada de la medida (de aquí viene su nombre). Dicho movimiento es en sentido tal, que su efecto sobre la variable controlada (a través de la válvula y del proceso), tiende a oponerse al cambio que se está produciendo en la misma. Este efecto es independiente de que la medida se encuentre por encima o por debajo del punto de consigna. No tiene en cuenta, por tanto, ni la magnitud ni el signo de la desviación, sino sólo su tendencia. En consecuencia, tampoco será sensible a una desviación permanente constante, que no intentará corregir.

Matemáticamente, la función que define el valor de la corrección aplicada a la válvula, sobre la posición inicial, debido a la acción derivativa, será

$$\Delta y = G T_d \frac{de}{dt}$$

en la que T_d es el factor de proporcionalidad que vamos a ver a continuación.

Tiempo derivativo.

Es el valor del factor de proporcionalidad de la acción derivativa, y se expresa en unidades de tiempo. Para un cambio de la desviación en forma de rampa, el *tiempo derivativo* T_d es el intervalo de tiempo en que la respuesta (movimiento en rampa de la posición de la válvula) va anticipada, por efecto de la acción derivativa, a la que se obtendría exclusivamente por la acción proporcional.

Es importante notar el efecto anticipativo que la acción derivativa produce en la respuesta. Ello equivale a lo que podría considerarse como una predicción, con un determinado tiempo de antelación, de los valores de la variable regulada, a la vista de la tendencia que presenta.

El valor del tiempo derivativo T_d , o de anticipación, es independiente de la velocidad de cambio (pendiente) de la desviación. A mayor velocidad corresponden unos efectos igualmente mayores de las acciones proporcional y derivativa, manteniéndose la relación de proporcionalidad entre los tres valores.

Ecuación del controlador.

Sumando algebraicamente las ecuaciones de cada acción, tendremos

$$y = G \left(e + T_d \frac{de}{dt} + N \right)$$

en la que $T_d =$ tiempo derivativo.

y los demás símbolos ya han sido definidos previamente. El valor original de N ha sido dividido por G , a efectos de introducirlo dentro del paréntesis.

1.8.5 CONTROLADOR PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO (PID).

Las tres acciones descritas hasta aquí pueden combinarse en un mismo controlador, para obtener todas sus ventajas y superar sus inconvenientes.

Resumiremos aquí las características y el comportamiento de cada una de las tres acciones.

1. La acción *proporcional* corrige la posición de la válvula en una cuantía proporcional a la desviación. Es de efecto instantáneo y enérgico, pero suele presentar desviación permanente.
2. La acción *integral* mueve la válvula a una velocidad proporcional a la señal de error o desviación. Es de efecto lento y progresivo, pero sigue actuando hasta anular la desviación permanente.

3. La acción *derivativa* corrige la posición de la válvula en una cantidad proporcional a la velocidad de cambio de la desviación. Ello produce un efecto anticipativo al tener en cuenta la tendencia de la variable controlada.

Ecuación del controlador.

Sumando algebraicamente las ecuaciones de cada una de las tres acciones de regulación se tiene

$$y = G \left(e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt} + K \right)$$

Donde

y = Salida del controlador.

$e = c - m$ = Error o desviación.

c = Punto de consigna.

m = Señal de medida.

G = Ganancia.

T_i = Tiempo integral.

T_d = Tiempo derivativo.

K = Posición inicial de la válvula (dividida por G).

También aquí podríamos expresar la ecuación en la forma

$$y = y_0 + G \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right)$$

En la que y_0 es la salida inicial del controlador, para $t = 0$, y el segundo término es la variación de la salida en el tiempo t ; esto es, $\Delta y = y - y_0$.

Función de Transferencia operacional.

La función de transferencia de un *controlador PID* será

$$\frac{Y}{E} = G \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Esto es,

$$Y = G E + G E \frac{1}{T_i s} + G E T_d s$$

En la que se distinguen claramente los términos proporcional, integral y derivativo, todos ellos igualmente afectados por la ganancia G y por la desviación E .

Téngase en cuenta que al operar con laplacianas estamos tratando con desviaciones de las variables con relación a un punto de referencia o de condiciones iniciales. En este caso la salida y queda referida al valor y_0 , que corresponde a las condiciones iniciales que se tenían para $t = 0$. Por tanto, la variable laplaciana Y se refiere a la variación en la salida del controlador, y tiene su correspondencia con la variable $\Delta y = y - y_0$, la cual es nula para $t = 0$, en que $y = y_0$. Con la variable e sucede otro tanto, pero ahora, por definición, partimos de unas condiciones iniciales de desviación nula, puesto que para $t = 0$ se tiene $c = m$, o bien $e = 0$.

La transmitancia para los demás controladores podrá deducirse fácilmente de esta, sin más que suprimir, en cada caso, el término o los términos correspondientes a las acciones no contenidas.

Ejecuciones especiales.

La acción derivativa, tal como se ha expuesto hasta aquí, tiene un notable inconveniente, que consiste en el hecho de que al actuar sobre la señal de error, es igualmente sensible tanto para variaciones de la variable controlada como del punto de consigna. Puesto que los cambios de este último, cuando son efectuados manualmente, suelen ser muy bruscos, se produce entonces, al ejecutarlos, un gran salto en la señal de salida del controlador. Para subsanar este inconveniente se suelen diseñar los controladores de tal manera que la *acción derivativa sea aplicada exclusivamente a la señal de medida*. Entonces la *ecuación del controlador PID* se convierte en

$$y = G \left(e + \frac{1}{T_i} \int e dt - T_d \frac{dm}{dt} + K \right)$$

Y su expresión laplaciana

$$Y = G E + G E \frac{1}{T_i s} - G M T_d s$$

$$Y = G E \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) - G M T_d s$$

Para el *controlador PD* tendríamos las mismas expresiones, pero suprimiendo el término integral:

$$Y = G E - G M T_d s$$

$$Y = G (E - M T_d s)$$

CAPÍTULO

2.

ARREGLOS

HECHOS EN EL

SISTEMA DE

TANQUES.

2.1 CAPACITIVO PURO.

No hay que perder de vista que, en la práctica, no existe ningún elemento, del tipo que fuere, absolutamente "puro". En este caso, al hablar de capacidad pura, este hecho toma especial relevancia, dado que se habla de condiciones en las que una variable tiende a infinito. Seamos, pues, conscientes de que la expresión teórica "infinito" tendrá el significado práctico de "muy grande" o, sencillamente, que los componentes físicos alcanzarían su estado de saturación o su deterioro, en los que cesaría el fenómeno. Un elemento constituido por una capacidad pura se comporta como un integrador. A continuación se verá algún ejemplo del elemento *capacidad pura*.

Nivel en tanque con Salida Constante.

Supongamos un sistema de nivel, como el representado en la figura 2.1, en el que el contenido de un tanque, de sección horizontal A , es extraído por una bomba de caudal constante, independientemente de la altura del nivel del tanque. Podemos imaginar una situación de equilibrio en la que el caudal de aporte q_1 es exactamente igual que el de evacuación q_2 , impuesto por la bomba. Si en un momento dado el caudal de aporte se ve incrementado en una cantidad q , resulta intuitivo que el nivel irá incrementándose a una velocidad constante, hasta alcanzar el rebose (o su vaciado total si q es negativo). Es decir, nunca se llegará a una nueva condición de equilibrio, como ocurría cuando el vaciado se producía mediante una restricción. Se trata, pues, de un proceso inestable, sin autorregulación.

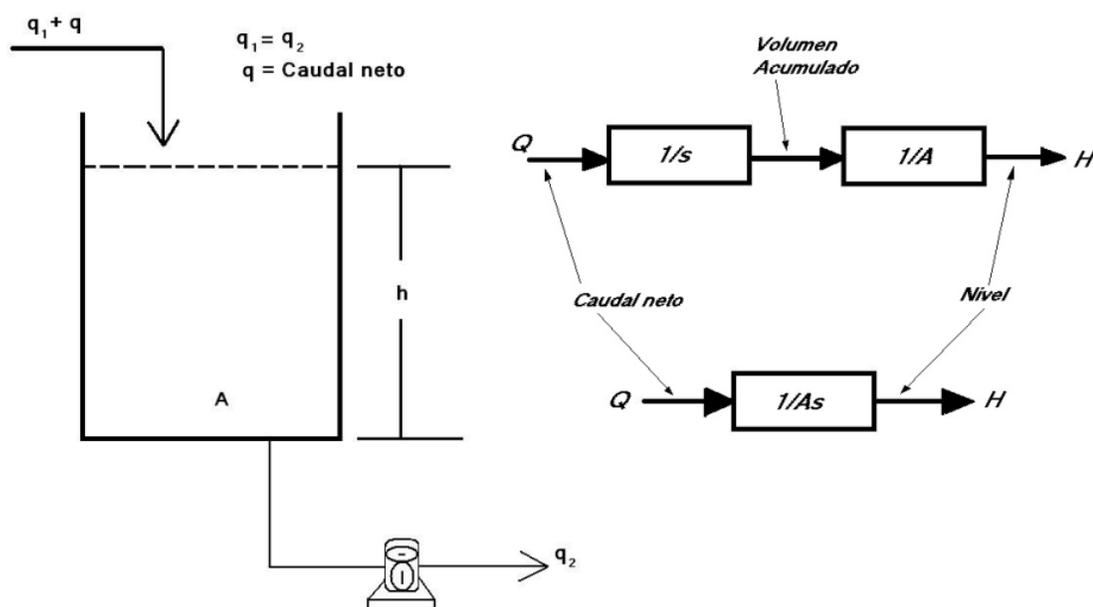


FIGURA 2.1. ELEMENTO CAPACIDAD PURA.

Debe notarse, por el diagrama de bloques, que este sistema no posee realimentación interna, que es la característica necesaria para que un sistema sea autorregulable, es decir, que frente a cualquier cambio de condiciones, tienda a un nuevo estado de equilibrio.

La ecuación de balance de material de este sistema es

acumulación = entrada - salida

$$A \frac{dh}{dt} = q_1 + q - q_2$$

pero como se ha hecho

$$q_1 = q_2$$

entonces

$$A \frac{dh}{dt} = q$$

Tomando laplacianas

$$A s H = Q$$

la función de transferencia será

$$\frac{H}{Q} = \frac{1}{As}$$

Obviamente no se puede hablar de constante de tiempo, que, en todo caso, sería infinita, de acuerdo con el ejemplo que se presenta más abajo.

Despejando dh en la última ecuación diferencial tenemos

$$dh = \frac{1}{A} q dt$$

en la que integrando ambos miembros de la igualdad se obtiene

$$h = \frac{1}{A} \int q dt$$

De aquí que un elemento capacidad pura pueda considerarse como un *elemento integrador*.

Despejando ahora la constante A , se obtiene

$$A = \frac{1}{h} \int q dt$$

Haciendo $h = 1$ y $q = 1$ (constante), e integrando entre los límites 0 y τ obtenemos

$$A = \tau$$

que debe interpretarse del siguiente modo: cuando el caudal neto de aportación (o extracción) al tanque es de valor unitario ($q = 1$), el tiempo que tarda el nivel en aumentar (o disminuir) en una unidad de longitud ($\Delta h = 1$) es igual a la constante A (área de la sección horizontal del tanque). De aquí que a esta constante se le llame *tiempo de integración*. Generalizando, puede decirse:

El *tiempo de integración* de un elemento *capacidad pura* es el tiempo necesario para que la variable de salida se incremente en una unidad, cuando la variable de entrada es constante e igual a la unidad.

Habitualmente, expresaremos la ecuación del comportamiento de un elemento capacidad pura como

$$y = \frac{1}{T_i} \int x dt$$

en donde:

x = Variable de entrada.

y = Variable de salida.

T_i = Tiempo de integración.

2.2 RETRASO LINEAL.

NIVEL DE UN TANQUE CON RESTRICCIÓN DE DESCARGA.

LINEALIZACIÓN DE FUNCIONES DE NIVEL.

Sea un tanque vertical, abierto, provisto de algún tipo de orificio o restricción de descarga en su parte inferior, tal como una válvula, que en este estudio consideraremos constante. El tanque, de sección horizontal A , tiene un caudal de aporte q_1 por su parte superior, y un caudal de salida q_2 a la atmósfera, por el orificio mencionado. (figura 2.2).

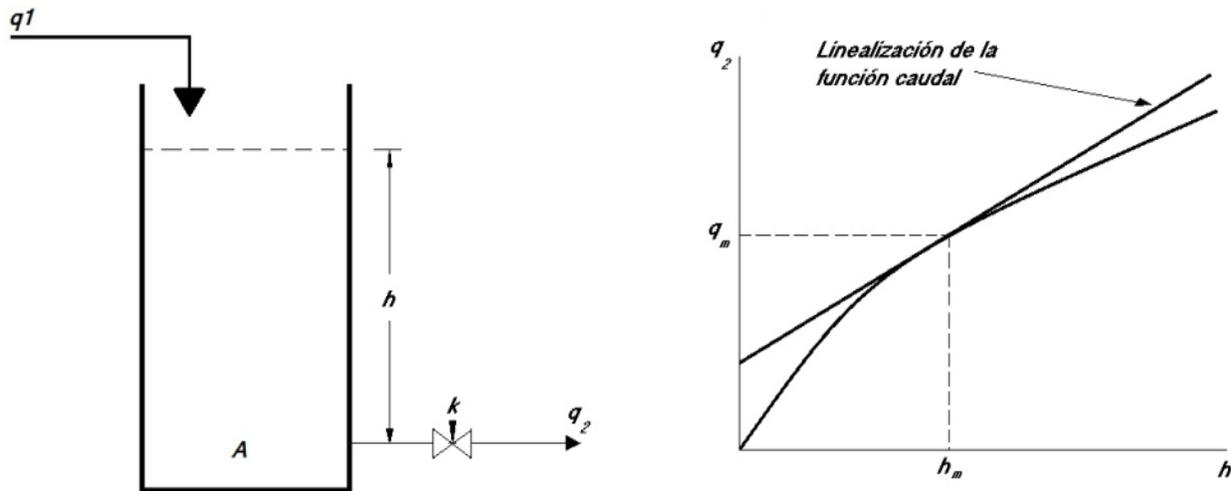


FIGURA 2.2. NIVEL EN TANQUE CON RESTRICCIÓN DE SALIDA CONSTANTE.

Es intuitivo el hecho de que, para un caudal de entrada constante, el nivel se estabilizará en un punto determinado, cuando la salida se iguale con la entrada, ya que a mayor nivel, mayor caudal de salida, y viceversa.

El caudal que fluye por una restricción sigue, básicamente, una ley cuadrática con la presión diferencial, pues se asume régimen turbulento.

En nuestro caso, un tanque abierto a la atmósfera, la presión diferencial en la restricción de salida es debida a la presión hidrostática existente como consecuencia del nivel de líquido en el tanque.

Si h es la altura del líquido, y k es un coeficiente dependiente de la geometría de la restricción y de la densidad del líquido, el caudal de salida será

$$q_2 = k \sqrt{h}$$

La ecuación de balance másico de caudales puede establecerse como:

$$\text{acumulación} = \text{entrada} - \text{salida}$$

Puesto que dV/dt es un caudal, y, por otra parte, $dV = Adh$, se tendrá:

$$q_1 - q_2 = A \frac{dh}{dt}$$

o bien,

$$q_1 - k \sqrt{h} = A \frac{dh}{dt}$$

Observamos aquí que hemos obtenido una función no lineal. Realmente es sencillo el cálculo de la altura de equilibrio h , dado un determinado caudal q_1 , ya que entonces $q_2 = q_1$. Pero el cálculo se complica para condiciones transitorias, y, por otro lado, este elemento puede formar parte de un sistema, más o menos complejo, en donde una ecuación no lineal, combinada con otras lineales, complicaría excesivamente los cálculos.

Es por ello, que en estos casos se procede a *linealizar* la función del caudal, mediante alguna forma de ecuación aproximada, de tal manera que la ecuación del caudal de salida es sustituida por una ecuación lineal. Para ello, se define un valor *medio de h*, preferentemente el *nivel normal de trabajo*, al que llamaremos h_m , y se opera con una función que corresponda a la ecuación de una recta tangente a la función original en el punto $[h = h_m, q_2 = q_m]$. La ecuación así obtenida será la función linealizada que se aplicará en los cálculos.

Los valores medios, para el nivel medio $h = h_m$, serán:

- *Pendiente m* de la recta tangente:

$$m = \left. \frac{dq_2}{dh} \right|_{h=h_m} = \frac{k}{2\sqrt{h}}$$

- *Caudal medio* de salida q_m :

$$q_m = k \sqrt{h}$$

por lo que

$$k = \frac{q_m}{\sqrt{h}}$$

y, por tanto,

$$m = \frac{q_m}{2h_m}$$

Sin embargo, a partir de este momento, es preciso operar con los valores de las variables referenciadas al valor definido como medio; es decir, con las desviaciones de los valores "normales". Matemáticamente, esto

equivale a efectuar un cambio de coordenadas a $[h_m, q_m]$. Véase la figura 3, en donde q y h representarían los valores absolutos de las variables, y \tilde{q} y \tilde{h} las desviaciones (variables de trabajo).

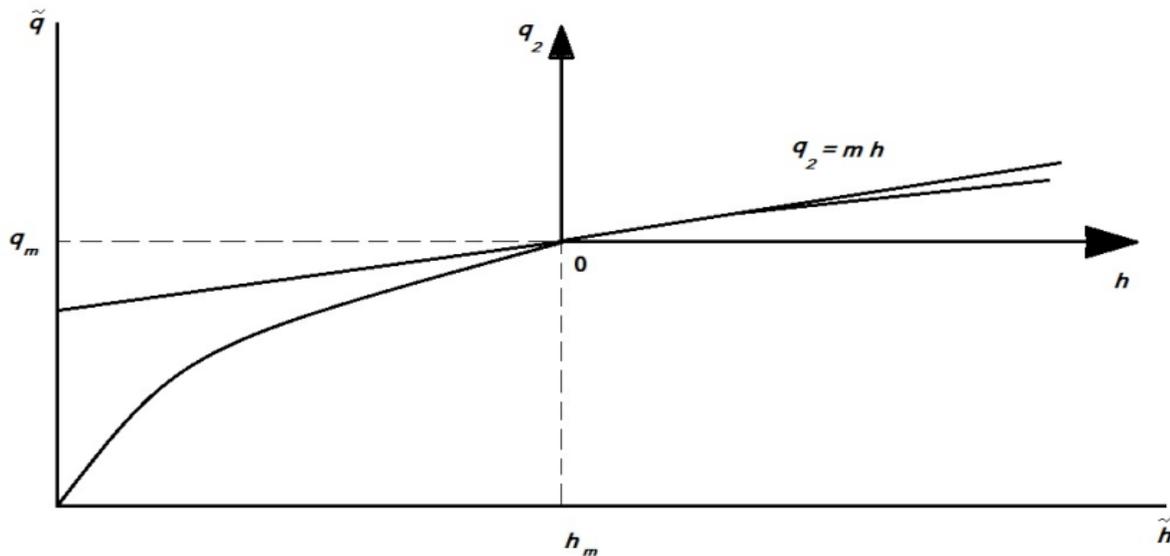


FIGURA 2.3. LINEALIZACIÓN DE LA FUNCIÓN CAUDAL. CAMBIO DE COORDENADAS.

De este modo, diremos

$$q_2 = \frac{dq_2}{dh} h = m h$$

con lo que la ecuación de balance másico queda:

$$q_1 - m h = A \frac{dh}{dt}$$

Tomando laplacianas y reordenando,

$$Q_1 = A s H + m H = H (A s + m)$$

y la función de transferencia será,

$$G = \frac{H}{Q_1} = \frac{1}{A s + m} = \frac{\frac{1}{m}}{\frac{A s}{m} + 1} = \frac{K}{T s + 1}$$

donde

$$K = \text{Ganancia del sistema} = \frac{1}{m} = \frac{2 \sqrt{h}}{k} = \frac{2 h_m}{q_m}$$

$$T = \text{Constante de tiempo} = \frac{A}{m} \quad (\text{ver su desarrollo más abajo})$$

Esto nos permitirá identificar y definir *la resistencia* y *la capacidad* de un sistema de nivel, cuando se refiera a un tanque atmosférico, de sección horizontal A , operando con una altura de nivel h , medida desde la posición de una restricción, a través de la cual escapa a la atmósfera un caudal q .

Puesto que $T = RC$ y ahora tenemos $T = A/m$, identificando términos entre estas dos ecuaciones obtendremos

$$R = \frac{1}{m} = \frac{dh}{dq}$$

La *resistencia* R de una restricción es un coeficiente que indica la relación entre la variación de nivel y la variación de caudal de salida, es decir, la dependencia del caudal (flujo) con el nivel (potencial).

Y también, $C = A$

La *capacidad* C es la superficie de la sección horizontal del tanque.

Resumiendo:

$$\text{Resistencia, } R = \frac{\text{variación de nivel}}{\text{variación de caudal}}$$

$$\text{Capacidad, } C = A \text{ (sección horizontal del tanque)}$$

Nótese que la capacidad es la superficie y no el volumen, lo que equivale a decir que es la relación entre la variación del contenido y la variación de nivel. En efecto, es la sección horizontal la que, cambiando el nivel, absorbe las entradas o salidas de fluido.

Más aún, podemos expresar T de la siguiente forma:

$$\text{Constante de tiempo } T = \frac{A}{m} = \frac{A(2h_m)}{q_m} = \frac{2V_m}{q_m}$$

donde $V_m = (A h_m)$ es el volumen del tanque hasta el nivel medio. Por tanto, la constante de tiempo de un tanque abierto con descarga a la atmósfera, es el doble del tiempo de llenado hasta el nivel de trabajo.

En general, si se tratase de un tanque cerrado (figura 2.4), bajo una presión h_0 , y descargando sobre una presión h_s , tendríamos que la presión diferencial neta en la descarga valdría $h + h_0 - h_s$. Las presiones son expresadas en términos de columna de líquido.

Entonces la salida sería

$$q_2 = k \sqrt{h + h_0 - h_s}$$

con lo que, para $h = h_m$, se obtiene:

$$q_m = k \sqrt{h_m + h_0 - h_s}$$

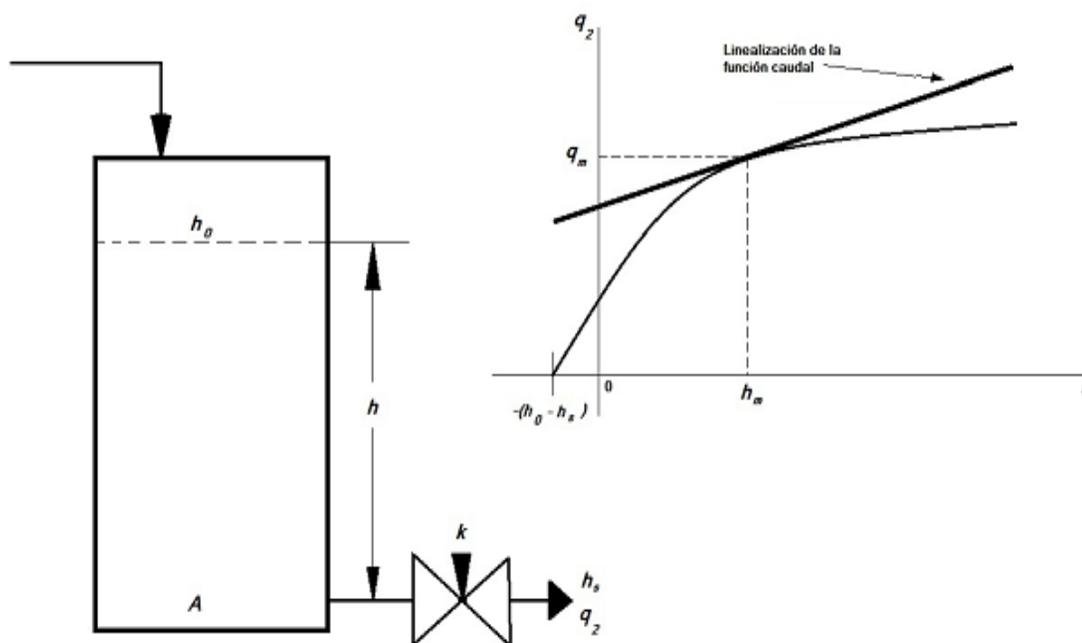
y efectuando los mismos cálculos hechos para el caso particular anterior, la ganancia y la constante de tiempo resultarían ser

$$K = \frac{1}{m} = \frac{2\sqrt{h_m + h_0 - h_s}}{k} = \frac{2(h_m + h_0 - h_s)}{q_m}$$

$$T = \frac{A}{m} = \frac{2A(h_m + h_0 - h_s)}{q_m}$$

También aquí operaríamos con las desviaciones del valor estimado como medio, tal como se dibujó en la fig. 2.3.

FIGURA 2.4.



2.3. TANQUES INTERACTUANTES Y NO INTERACTUANTES. SISTEMAS DE PRIMER ORDEN EN SERIE. TANQUES DE ALMACENAMIENTO EN SERIE.

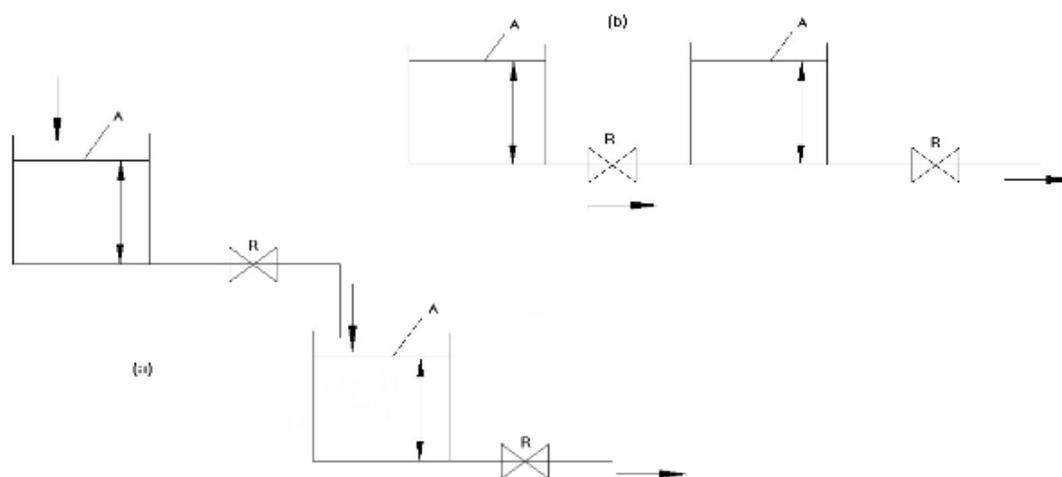


FIGURA 2.5. TANQUES DE ALMACENAMIENTO EN SERIE.

En la figura anterior (inciso a), los dos tanques están dispuestos de forma que el primero descarga en el segundo, pero este último no afecta al funcionamiento del primero. De hecho, el segundo podría suprimirse sin que por ello se altere la dinámica del primero. Esta disposición se conoce como *no interactuante*.

Sin embargo, en la misma figura (pero en el inciso b) no ocurre lo mismo. El primer tanque descarga en el segundo pero, debido a su disposición, sí existe una influencia del segundo sobre el primero y, en consecuencia, este sistema en serie es *interactuante*. Esta cuestión reviste especial importancia por cuanto al conectar varios sistemas debe tenerse en cuenta si la dinámica individual de cada uno de ellos es o no afectada por los demás. Ahora se obtendrá, para estos dos sistemas, el modelo matemático correspondiente.

A partir del modelo del ejemplo 1* (ver página siguiente), para el primer tanque:

$$q_e - q' = A_1 \frac{dh_1}{dt} \quad (\text{A})$$

$$q' = \frac{h_1}{R_1} \quad (\text{B})$$

y para el segundo:

$$q' - q_s = A_2 \frac{dh_2}{dt} \quad (\text{C})$$

$$q_s = \frac{h_2}{R} \quad (\text{D})$$

En el caso del inciso b, para el primer tanque,

$$q_e - q' = A_1 \frac{dh_1}{dt} \quad (A')$$

$$q' = \frac{h_1 - h_2}{R_1} \quad (B')$$

y para el segundo tanque,

$$q' - q_s = A_2 \frac{dh_2}{dt} \quad (C')$$

$$q_s = \frac{h_2}{R_2} \quad (D')$$

Como se puede observar, la única diferencia que existe entre ambos modelos está en las ecuaciones (B) y (B'). En el caso (a), el caudal que sale del primer tanque sólo depende del nivel de líquido en éste. Sin embargo, en el caso (b), dependerá de la diferencia entre los niveles de ambos tanques. Nótese que el caudal fluiría hacia la derecha cuando h_1 fuera mayor a h_2 , sería cero cuando $h_1 = h_2$ y fluiría hacia la izquierda cuando h_1 fuera menor a h_2 . Esta aparentemente pequeña diferencia puede complicar bastante el análisis dinámico. Puede ocurrir que, aunque el diseño de los elementos individuales sea el adecuado, al combinarlos entre sí existan interacciones recíprocas que requerirán de un análisis global del sistema formado por tales elementos.

*EJEMPLO 1. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE LÍQUIDOS.

En este caso, se han hecho algunos supuestos para facilitar el análisis. La sección del tanque es constante (de otro modo habría que agregar un área variable); la resistencia se considera concentrada en la válvula (despreciando la fricción en los tubos). Esta última suposición no es excesiva: en una línea corta, la mayor parte de la resistencia por fricción reside en las válvulas y los accesorios.

Las ecuaciones de este sistema corresponden a un balance de materia en el tanque:

$$\text{caudal entrante} - \text{caudal saliente} = \text{acumulación de materia en el tanque.}$$

Obviamente, la acumulación puede ser positiva, negativa o cero, dependiendo de los valores de los flujos de entrada y de salida. Esto puede expresarse como:

$$q_e - q_s = A \frac{dh}{dt} \quad (A)$$

El término de la derecha representa la variación de volumen en el tanque. Por otra parte, el caudal que sale del tanque depende tanto de h (carga hidrostática) como de la resistencia de la válvula. Como es sabido, para cualquier tipo de flujo,

$$\text{flujo} = \frac{\text{potencial}}{\text{resistencia}}$$

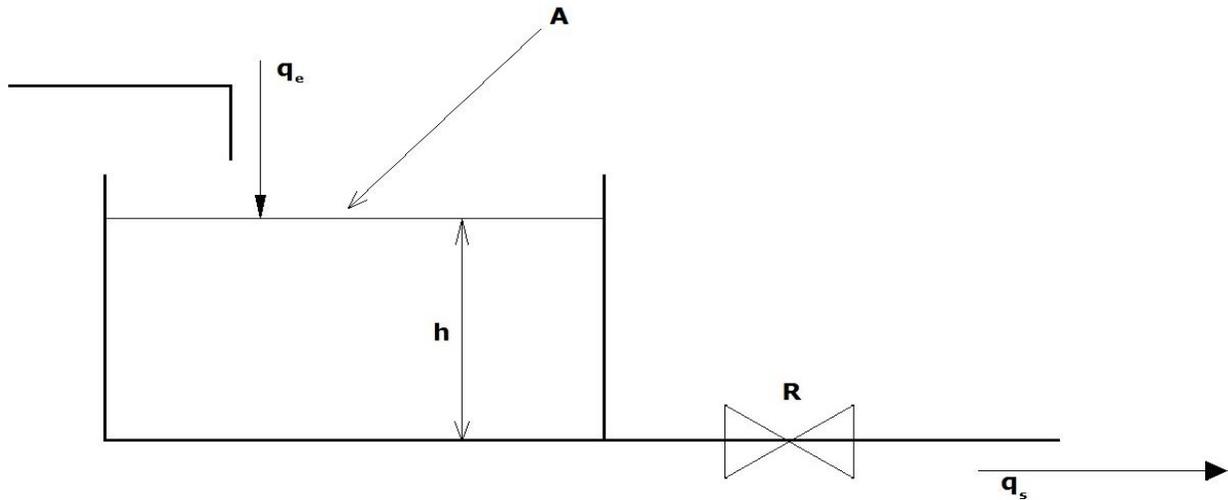


FIGURA 2.6. TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE LÍQUIDOS.

Si el flujo es de corriente eléctrica, el potencial es el voltaje aplicado y la resistencia es la resistencia eléctrica; si es un flujo de calor, el potencial es la diferencia de temperaturas y la resistencia es el inverso de la conductividad o del coeficiente convectivo; si el flujo es de una sustancia líquida o gaseosa, el potencial es la diferencia de presiones y la resistencia es la fricción viscosa. Para el flujo de salida del tanque, el potencial será la presión ejercida por la columna de líquido, debida a su altura h , y la resistencia será la que ofrece al flujo la válvula (despreciando la fricción en la línea).

$$q_s = \frac{h}{R} \quad (B)$$

Las ecuaciones (A) y (B) constituyen el modelo matemático del sistema.

CAPÍTULO

3.

PROTOCOLOS PARA EL SISTEMA DE TANQUES.

Es en este Capítulo donde se presentan los desarrollos que habrán de realizar los alumnos a fin de mejorar su comprensión de lo visto en clase, obtengan sus propias conclusiones y concebir la simulación de procesos como una herramienta útil.

Sí se es necesario consultar los temas correspondientes a la Ingeniería Básica del arreglo de tanques -esto es, Balances de masa, DFP, DTI, Isométrico de tubería- habrá de consultarse a García Robledo ⁽⁵⁾.

3.1 PROTOCOLO A. ANÁLISIS DE LOS TANQUES EN CAPACITIVO PURO.

El estudiante de Ingeniería Química deberá de:

1. Identificar que este es un Problema Típico de Ingeniería, en donde se formula cual es el planteamiento, hacer un análisis riguroso del mismo, contemplar toda la gama de soluciones posible que pudiera haber, se selecciona la mejor de ellas y se hace su especificación. Así, se deberá delimitar perfectamente cuál es el sistema a trabajar y cual el entorno, requisito básico.
2. Entender cómo se compone el Proceso Capacitivo Puro y que Tanques se trabajan.
3. Identificar la Estructura de Control para este Proceso: Elemento Primario de medición, Comparador-Controlador, Elemento Final de Control. Además, identificar las posibles perturbaciones que pueden alterar la condición de equilibrio dinámico en el sistema estudiado.
4. Establecer Situación de Equilibrio y Toma de Datos referente a esta. Además, analizar el Comportamiento del Sistema por medio de un modelo con Balance de Masa.
5. Identificar que los Tanques tienen una Área de Sección Transversal Fija, lo cual es requisito indispensable para poder definir el Tiempo de Integración. Establecer la función de transferencia para el sistema y los caudales de entrada y salida.
6. Calibrar el Controlador y establecer el Set Point.
7. Trabajar el Sistema tanto en Modo Manual como de manera Automática.

PROCEDIMIENTO:

1. Seleccionar tanque superior e inferior TA-01 y TA-03.
2. Otro equipo puede trabajar con el TA-02 y TA-04.
3. Trabajar la bomba para llenar el tanque superior. Comprobar Flujo circulante por esta.
4. Tomar tiempo de integración.
5. Con el controlador previamente programado, trabajar el sistema en modo automático.

Discusión:

1. Comprender que este es un sistema con una sola entrada-una sola salida, dado que en la vida real los procesos se componen de múltiples entradas-múltiples salidas, con lo cual su forma de control es de modo distinto.
2. Comprender que es un sistema lineal dinámico.
3. Analizar cuando el sistema trabaja en automático el tiempo muerto involucrado en este proceso.

3.2 PROTOCOLO B. ANÁLISIS DE LOS TANQUES CON RETRASO LINEAL.

El estudiante de Ingeniería Química deberá de:

1. Al igual que en el Protocolo anterior, este es un Problema Típico de Ingeniería, donde se formula cual es el planteamiento, se hace un análisis riguroso del mismo, contemplando toda la gama de soluciones posible que pudieran existir, se selecciona la mejor de ellas y se hace su especificación. Así, se deberá delimitar perfectamente cuál es el sistema a trabajar y cual el entorno, requisito básico.
2. Entender cómo se compone el Proceso de Retraso Lineal y que Tanques se trabajan.
3. Identificar la Estructura de Control para este Proceso: Elemento Primario de medición, Comparador-Controlador, Elemento Final de Control. Además, identificar las posibles perturbaciones que pueden alterar la condición de equilibrio dinámico en el sistema estudiado.
4. Establecer Situación de Equilibrio y Toma de Datos referente a esta. Además, analizar el Comportamiento del Sistema por medio de un modelo con Balance de Masa.
5. Identificar que los Tanques tienen una Área de Sección Transversal Fija y la restricción al flujo que presenta la válvula ubicada a la descarga del tanque. Establecer la función de transferencia para el sistema y los caudales de entrada y salida, así como la constante de la válvula.
6. Calibrar el Controlador y establecer el Set Point.
7. Trabajar el Sistema tanto en Modo Manual como de manera Automática.

PROCEDIMIENTO:

1. Seleccionar tanque superior e inferior TA-01 y TA-03.
2. Otro equipo puede trabajar con el TA-02 y TA-04.
3. Dependiendo de los tanques seleccionados, trabajar la respectiva bomba para llenar el tanque superior. Comprobar Flujo circulante por esta.
4. Verificar la restricción al flujo que presenta la válvula.
5. Con el controlador previamente programado, trabajar el sistema en modo automático.

Discusión:

1. Comprender que este es un sistema con una sola entrada-una sola salida, dado que en la vida real los procesos se componen de múltiples entradas-múltiples salidas, con lo cual su forma de control es de modo distinto.
2. Este sistema no es lineal debido a la restricción que presenta la válvula, pero se puede linealizar y con ello simplificar el análisis.
3. Analizar cuando el sistema trabaja en automático el tiempo muerto involucrado en este proceso.

3.3 PROTOCOLO C. ANÁLISIS PARA TANQUES INTERACTUANTES Y NO INTERACTUANTES.

El estudiante de Ingeniería Química deberá de:

1. Identificar que este es un Problema Típico de Ingeniería básico, sencillo, lineal, de una única entrada-una única salida, en donde se habrá de formular un planteamiento, hacer un análisis riguroso del mismo, contemplar toda la gama de soluciones posible que pudiera haber, seleccionar la mejor de ellas y hacer su especificación. Así, se tendrá que delimitar perfectamente cuál es el sistema a trabajar y cual el entorno, requisito básico.
2. Entender cómo se compone el Proceso de Tanques Interactuantes, Tanques no Interactuantes y que tanques trabajar en ambos casos.
3. Identificar la Estructura de Control para este Proceso: Elemento Primario de medición, Comparador-Controlador, Elemento Final de Control. Además, identificar las posibles perturbaciones que pueden alterar la condición de equilibrio dinámico en el sistema estudiado.
4. Establecer Situación de Equilibrio y Toma de Datos referente a esta. Además, analizar el Comportamiento del Sistema por medio de un modelo con Balance de Masa.
5. Identificar que los Tanques tienen una Área de Sección Transversal Fija y no Variable, lo cual facilita el análisis matemático. Establecer la función de transferencia para el sistema y los caudales de entrada y salida. Identificar en este caso, como influye para Tanques Interactuantes el Primer Tanque sobre el Segundo para un nivel de líquido dado, el Segundo sobre el primero cuando aquel tiene mayor nivel de almacenamiento. En conclusión, como se influyen ambos tanques.
6. Calibrar el Controlador y establecer el Set Point.
7. Trabajar el Sistema tanto en Modo Manual como de manera Automática.
8. Obtener sus propias conclusiones.

PROCEDIMIENTO:

1. Seleccionar tanque superior e inferior TA-01 y TA-03.
2. Otro equipo puede trabajar con el TA-02 y TA-04.
3. Trabajar la bomba para llenar el tanque superior. Comprobar Flujo circulante por esta.
4. Con el controlador previamente programado, trabajar el sistema en modo automático.

Discusión:

1. Comprender que este es un sistema escolar ilustrativo con una sola entrada-una sola salida (Simple Input-Simple Output, SISO), dado que en la vida real los procesos se componen de múltiples entradas-múltiples salidas (Sistemas MIMO), con lo cual su forma de control es de manera totalmente distinta, haciéndolo muchas veces mediante prueba y error.
2. Comprender que es un sistema lineal dinámico.
3. Analizar cuando el sistema trabaja en automático el tiempo muerto involucrado en este proceso.
4. El sistema da para intentar la simulación de procesos.

CONCLUSIONES.

En el presente trabajo se ha desarrollado un Tablero de Control para el Sistema de Tanques diseñado en la tesis de García Robledo ⁽⁵⁾, donde se pretende que los alumnos que cursan la carrera de Ingeniería Química en FES-Zaragoza visualicen los conceptos y la matemática presente en la materia de Dinámica y Control de Procesos impartida en esta carrera, lo cual les ayude en su formación académica y profesional, tratando de conseguir así mejores aprovechamientos escolares y profesionales.

Al arreglo de tanques se les puede trabajar de tres maneras distintas: Capacitivo Puro, Retraso Lineal y los denominados Tanques Interactuantes. Cada uno tiene sus propias variables y los tres se pueden trabajar ya sea de manera manual o de forma automática. Se hace énfasis en que el arreglo de tanques es del tipo SISO, y que sólo sirve de base para proporcionar al estudiante un panorama más de la carrera, en donde, indiscutiblemente, los arreglos presentes en la vida profesional real son mucho más elaborados, en donde se pueden manejar distintos agentes de control hacia distintos medios controlados (con todo y su infinidad de variables que pudieran presentarse), conllevando con ello hacia lo que es la simulación de procesos, cosa que no era finalidad en esta tesis, pero que, sin embargo, el estudiante deberá tener presente, porque los sistemas en una factoría indiscutiblemente son multivariantes, y antes de tratar de operar manualmente cualquier equipo es deseable ya tener un bosquejo dentro de una computadora que nos proporcione una idea del trabajo de determinado equipo, su respectivo rango de operación, sus condiciones de trabajo, la interacción de ese equipo con los del resto de la planta (cosa importantísima), la variedad de disturbios y perturbaciones -tanto propias del proceso como las que tienen su origen en el medio ambiente- que podrían influir en la obtención del producto deseado, y la gama de productos y reactivos con los cuales se puede trabajar, así como el poder visualizar como trabaja toda la planta en su conjunto, esto con el fin de ser lo más profesional posible en la vida diaria.

Se podrá ver así que los sistemas reales, por lo general, son de un orden matemáticamente superior, pero que indiscutiblemente se pueden hacer simplificaciones que nos permitan conocer su respectivo comportamiento y tratarlos como si fueran sistemas lineales; una de esas simplificaciones útiles en el Control de Procesos indiscutiblemente son las Tablas de la Transformada de Laplace.

Se espera que cuando los alumnos concluyan con sus prácticas hayan aprendido a manejar un controlador PID digital, a establecer el setpoint, y que todos los conceptos que acompañan y dan base a la Dinámica y Control de Procesos se visualicen aquí, despejando cualquier duda.

BIBLIOGRAFÍA.

1. **Roca Cusidó, Alfred. CONTROL DE PROCESOS, 2ª. Edición. Barcelona, España. Editorial Alfaomega, Ediciones UPC (Universitat Politècnica de Catalunya). México, 2002.**
2. **Perry, Robert H.; Chilton, Cecil H.; BIBLIOTECA DEL INGENIERO QUÍMICO, Volumen VI. 2ª Edición en Español. México. Editorial McGraw-Hill. 1987.**
3. **Ávalos Arzate, Guillermo; Montúfar Navarro, Marcela Adriana; Ortiz Hernández, Fernando Elí; Villalobos Ordaz, Gustavo. TEORÍA DE CONTROL, AJUSTE DE CONTROLADORES INDUSTRIALES. 1ª Edición. México. Instituto Politécnico Nacional, Dirección de Publicaciones. 2002.**
4. **Creus Solé, Antonio. SIMULACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS POR ORDENADOR, 2ª Edición. México. Marcombo, Ediciones Técnicas. 2007.**
5. **García Robledo, Rodrigo. DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA LA ENSEÑANZA DE LA DINÁMICA Y CONTROL DE PROCESOS A NIVEL LABORATORIO. Tesis de Ingeniería Química. UNAM, FES Zaragoza. México, 2007.**
6. **Renau Ballester, Ruy. ELEMENTOS DE CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS. Puebla, México. Ediciones Reverté (Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Dirección General de Fomento Editorial). 2005.**
7. **Bolzern, Paolo; Scattolini Riccardo; Schiavoni, Nicola. FUNDAMENTOS DE CONTROL AUTOMÁTICO. 3ª Edición. Madrid, España. McGraw-Hill. 2009.**
8. **Pérez García, Miguel A.; Álvarez Antón, Juan C.; Campo Rodríguez, Juan C.; Ferrero Martín, Fco. Javier; Grillo Ortega, Gustavo J.; INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA. España. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón; Universidad de Oviedo; Editorial Thomson; 2005.**

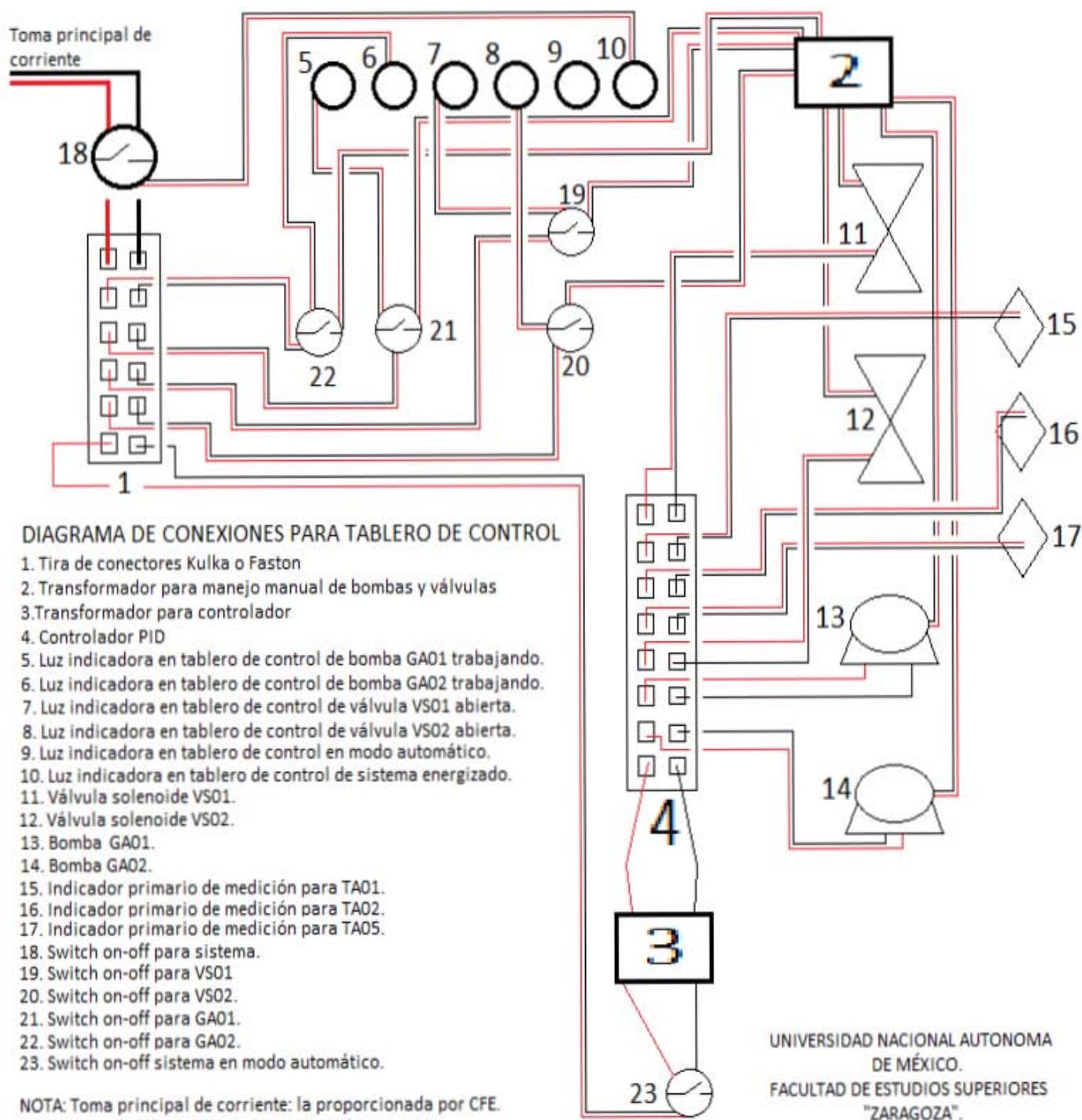
ANEXO.

Diagrama de

Alambrado para

Tablero de

Control.



NOTA: Toma principal de corriente: la proporcionada por CFE.
Voltaje para bombas, válvulas y controlador: 12 VCD.