

MEDICIONES E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Elaborado por:
Prof. Juan Calderón
Prof. Yamilet Sánchez Montero

Febrero 1993
2da. Revisión: Septiembre 1995
3ra. Revisión: Octubre 1998
4ta. Revisión: Marzo 2000
5ta. Revisión: Diciembre 2004

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS

CONTENIDO

1.- CONCEPTOS DE MEDICIÓN Y CONTROL	6
1.1.- INTRODUCCIÓN.	6
1.2.- CONCEPTOS DE MEDICIÓN Y CONTROL.	7
1.3.- CLASES DE INSTRUMENTOS.	8
2.- ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN Y CONTROL	10
2.1.- TRANSDUCTOR.	10
2.2. ELEMENTO PRIMARIO O SENSOR.	10
2.3.- RECEPTORES.	11
2.4. TRANSMISORES.	11
2.5.- INDICADORES.	12
2.6.- REGISTRADORES.	12
2.7.- CONVERTIDORES.	12
2.8.- CONTROLADORES.	13
2.9.- ELEMENTOS DE ACCIÓN FINAL.	13
2.10.- INTERRUPTORES DE LÍMITE.	13
 EJERCICIOS.	14
3.- TRANSMISORES Y CONTROLADORES	15
3.1.- TRANSMISORES.	15
3.1.1.- TRANSMISORES NEUMÁTICOS.....	15
3.1.2.- TRANSMISORES ELÉCTRICOS.	16
3.1.2.1.- <i>Transmisores analógicos.</i>	17
3.1.2.2.- <i>Transmisores inteligentes.</i>	18
3.1.2.3.- <i>Esquemas de conexión de los transmisores eléctricos.</i>	20
3.2.- CONTROLADORES	23
3.2.1.- CONTROLADOR TODO O NADA (<i>ON-OFF</i>).	23
3.2.2.- CONTROL FLOTANTE DE VELOCIDAD CONSTANTE.	23
3.2.3.- CONTROL PROPORCIONAL DE TIEMPO VARIABLE.	24
3.2.4.- CONTROL DE SALIDA CONTINUA.....	25
 EJERCICIOS.	26

4.- SIMBOLOGÍA NORMALIZADA ISA PARA LA ELABORACIÓN DE PLANOS DE INSTRUMENTACIÓN DE PROCESOS.....	28
4.1.- NORMATIVA PARA LA DESIGNACIÓN DE INSTRUMENTOS.....	28
4.2.- NORMATIVA PARA REPRESENTAR LAS CONEXIÓN A INSTRUMENTOS.	30
4.3.- NORMATIVA PARA LOS SÍMBOLOS DE LOS INSTRUMENTOS.....	30
 EJERCICIOS.....	33
5.- CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS DE LOS INSTRUMENTOS	36
5.1. CARACTERÍSTICAS RELACIONADAS CON EL RANGO.....	36
5.1.1.- RANGO DE MEDICIÓN (<i>RANGE</i>).....	36
5.1.2.- ALCANCE (<i>SPAN</i>).	36
5.1.3.- RANGO CON CERO ELEVADO.....	37
5.1.4.- RANGO CON CERO SUPRIMIDO.	37
5.1.5.- VARIABILIDAD DEL RANGO (<i>RANGEABILITY</i>).	37
5.2.- CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DE LOS INSTRUMENTOS.....	38
5.2.1.- DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DE UN INSTRUMENTO.	38
5.2.2.- EXACTITUD (<i>ACCURACY</i>).....	39
5.2.2.1.- <i>Formas de estimar la exactitud</i>	39
5.2.2.2.- <i>Formas de expresar la exactitud</i>	40
5.2.3.- PRECISIÓN O REPETIBILIDAD (<i>REPEATABILITY</i>).	42
5.2.3.1.- <i>Formas de estimar la precisión</i>	42
5.2.4.- DIFERENCIA ENTRE EXACTITUD Y PRECISIÓN.	43
5.2.5.- BANDA MUERTA (<i>DEAD BAND</i>).	45
5.2.6.- HISTÉRESIS.....	46
5.2.7.- RESOLUCIÓN.	46
5.2.8.- LINEALIDAD.	47
5.2.9.- DERIVA (<i>DRIFT</i>).....	47
5.2.10.- ESTABILIDAD.	47
5.2.11.- SENSIBILIDAD.....	48
5.3.- CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS.	49
5.3.1.- TIEMPO MUERTO.	50
5.3.2.- TIEMPO DE RESPUESTA AL ESCALÓN.....	50
5.3.3.- TIEMPO DE ESTABLECIMIENTO.	50
5.3.4.- TIEMPO DE ELEVACIÓN.....	51
5.3.5.- VELOCIDAD DE RESPUESTA.	51
5.3.6.- CONSTANTE DE TIEMPO.	51
 EJERCICIOS.....	51
6.- ANÁLISIS DE ERROR.....	54
6.1.- FUENTES DE ERROR.	54
6.2.- TIPOS DE ERROR EN UN INSTRUMENTO.	55

6.3.- FORMAS DE EXPRESAR EL ERROR EN UNA MEDICIÓN.....	56
6.4.- ESTIMACIÓN DEL ERROR TOTAL EN UNA MEDICIÓN.	57
6.4.1.- ERROR MÁXIMO EN UNA MEDICIÓN.	57
6.4.2.- ERROR PROBABLE EN UNA MEDICIÓN.	59
 EJERCICIOS.....	60
7.- VARIABLES DE PROCESO	65
7.1.- DENSIDAD.....	65
7.2.- VISCOSIDAD.	66
7.3.- FLUJO.	67
7.4.- PRESIÓN.....	68
7.5.- TEMPERATURA.	69
 EJERCICIOS.....	69
8.- INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE VARIABLES DE PROCESO.....	71
8.1. MEDIDAS DE PRESIÓN.....	71
8.1.1. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE PRESIÓN.....	72
8.1.1.1. <i>Instrumentos mecánicos.....</i>	73
8.1.1.2. <i>Elementos neumáticos.</i>	77
8.1.1.3. <i>Elementos electromecánicos.....</i>	77
8.1.1.4. <i>Elementos electrónicos de vacío.</i>	79
8.2. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE NIVEL.....	79
8.2.1. MÉTODOS DIRECTOS.	71
8.2.2. MÉTODOS BASADOS EN PRESIÓN HIDROSTÁTICA.	71
8.2.3. MÉTODOS MECÁNICOS.....	73
8.2.4. INSTRUMENTOS BASADOS EN ONDAS.	74
8.2.4.1. <i>Sistema de medición por radar.....</i>	74
8.2.4.2. <i>Medidor por ultrasonido.....</i>	74
8.3.- INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA.....	75
8.4.1. TERMOPARES.....	75
8.4.1.1. <i>Principio de medición.....</i>	75
8.4.1.2. <i>Tipos de termopares.</i>	78
8.4.1.3. <i>Rango de medición de los termopares.....</i>	78
8.4.1.4. <i>Límites de exactitud.</i>	81
8.4.1.5. <i>Estilos de construcción de los termopares.</i>	81
8.4.1.6. <i>Criterios de selección.</i>	84
TIPO DE TERMOPAR	84
8.4.1.7. <i>Fuentes de error en medición de temperatura con termopares.....</i>	85
8.4.1.2. <i>Sensores de resistencia (RTD).....</i>	87

8.4.2.- PIRÓMETROS.	95
8.4.2.1.- Principio de medición.	95
8.4.3.- RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA.	98
8.5.- INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE FLUJO.....	98
8.5.1.- MEDIDORES DE FLUJO VOLUMÉTRICO.....	99
8.5.1.1.- Instrumentos basados en presión diferencial.	99
8.5.1.2.- Medidores de flujo de desplazamiento positivo.....	103
8.5.1.3.- Medidores magnéticos de flujo.....	103
8.5.1.4.- Medidores sónicos de flujo.....	103
8.5.2.- MEDIDORES DE FLUJO MÁSICO.	105
8.5.2.1.- Medidores térmicos de caudal.	105
8.5.2.2.- Medidor de coriolis.	105
 EJERCICIOS.....	107
9.- VÁLVULAS DE CONTROL.....	111
9.1.- INTRODUCCIÓN.	111
9.2.- COMPONENTES DE UNA VÁLVULA DE CONTROL.....	111
9.2.1.- TIPOS DE CUERPOS DE VÁLVULAS.....	112
9.2.1.1. Válvulas de globo.	112
9.2.1.2. VÁLVULAS DE TIPO GIRATORIO.	113
9.3. EL ACTUADOR DE LAS VÁLVULAS DE CONTROL.....	114
9.4. CARACTERÍSTICAS DE FLUJO EN VÁLVULAS DE CONTROL.....	115
9.4.1. CARACTERÍSTICAS INHERENTES DE FLUJO	115
9.4.2. CARACTERÍSTICA INSTALADA DE FLUJO.....	116
9.5. DERIVACIÓN DE LA ECUACIÓN BÁSICA PARA EL CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA VÁLVULA.	117
9.6. PROBLEMAS DE CAVITACIÓN Y FLASHING.	119
 EJERCICIOS.....	119

CAPÍTULO I

1.- CONCEPTOS DE MEDICIÓN Y CONTROL

1.1.- INTRODUCCIÓN.

En todo proceso industrial, por muy sencillo que sea, es siempre necesario el uso de instrumentos de medición y control que permitan entre otras cosas mantener los parámetros de calidad de los productos generados por el proceso, supervisar la operación del proceso, recopilar información referente a los volúmenes de producción y cantidad de materia prima consumida, determinar condiciones inseguras de operación, etc.

Aún cuando los avances tecnológicos permiten la elaboración de instrumentos cada vez más exactos, versátiles y fáciles de usar, es también cierto que la selección y aplicación adecuada de los instrumentos depende de una gran cantidad de factores como son: conocimiento del proceso, conocimiento de los diferentes principios de medición, interpretación adecuada de las características dadas por el fabricante de cada instrumento, correcta instalación y mantenimiento de los instrumentos entre otros.

El área de instrumentación es multidisciplinaria, en ella se desempeñan profesionales de ingeniería eléctrica, electrónica, química, sistemas, mecánica entre otros. Como toda disciplina de ingeniería, los proyectos se ejecutan en varias fases. El ciclo de vida completo de un sistema de instrumentación contempla desde la definición conceptual del proyecto, el diseño, la implantación, el arranque y puesta en marcha, la operación, el mantenimiento, y finalmente la desincorporación del mismo. Durante todas estas fases del ciclo de vida son necesarios diversos conocimientos de los instrumentos para lograr el mejor desempeño de los mismos.

¿Cuáles son entonces las funciones de un profesional que se desempeña en área de instrumentación?:

- Seleccionar instrumentos
- Especificar instrumentos
- Generar planos de instrumentación
 - Diagramas de Tuberías e Instrumentación (DTI).
 - Diagramas de lazos de control.
 - Diagramas de instalación (mecánicos y eléctricos).
- Supervisar la instalación, arranque y puesta en marcha de sistemas de instrumentación.
- Mantenimiento de instrumentos.

La fase de diseño consiste en los tres primeros puntos antes mencionados. Típicamente el diseño se divide a su vez en tres fases: a) La ingeniería conceptual; b) La ingeniería básica; y c) La ingeniería de detalles.

En la ingeniería conceptual se identifican las necesidades, se definen los objetivos, se plantean posibles soluciones, y finalmente se realiza el estudio de factibilidad técnica y económica de cada alternativa propuesta y se selecciona una de ellas.

En la ingeniería básica, se realizan las especificaciones técnicas de la instrumentación a ser utilizada en el proyecto y se realizan los planos de tubería e instrumentación. Estas especificaciones van dirigidas fundamentalmente a la procura de los instrumentos.

En la ingeniería de detalles se genera toda la documentación necesaria para la instalación, arranque y puesta en operación de los instrumentos. Entre algunos de los documentos que se deben generar en esta fase se encuentran: Diagramas Tuberías e Instrumentación (DTI), diagramas de lazo de control, diagramas de instalación mecánica y eléctrica de instrumentos, lista de instrumentos, y lista de cables de instrumentación.

El objetivo de este curso es el de impartir los conocimientos básicos necesarios para la correcta

selección, y aplicación de instrumentos en el área industrial. Además de ciertos conceptos básicos de mediciones y control, también se estudiarán diferentes principios de medición, sensores e instalación de instrumentos.

1.2.- CONCEPTOS DE MEDICIÓN Y CONTROL.

- ***Medida.***

Una medida es un número (real, complejo, vector, etc.) que expresa la relación entre una cantidad y la unidad utilizada para medirla. El valor exacto de una medida no es posible precisarlo rigurosamente (consecuencia del principio de incertidumbre de Heisenberg), por lo que toda medida debe ir acompañada de un valor que indique la incertidumbre o error con la que fue determinada.

Si por ejemplo un termómetro marca 25 °C, y sabemos que dicho instrumento permite medir la temperatura con una aproximación de 1°C, entonces debemos expresar la medida como $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

- ***Medición.***

Es la determinación de una medida. Una medición puede ser realizada, por comparación (directa o indirecta), con cantidades cuyas unidades son las unidades básicas o estándares del sistema de unidades utilizado. Para la realización de una medición se utiliza un instrumento como medio físico para determinar la magnitud de una cantidad o variable.

Usualmente la variable medida es determinada indirectamente, mediante el efecto que produce en una variable secundaria conocida con el nombre de variable medible. Así por ejemplo, mediante la medición de la elongación de un resorte (variable medible) se determina la magnitud del peso que pende de uno de los extremos.

- ***Instrumento o sistema de medición.***

Es uno o más dispositivos de medición conectados de forma tal de poder realizar una medición completa. Un dispositivo de medición consta de uno o más elementos básicos, además de otros componentes, para conformar una unidad encargada de ejecutar una o más operaciones de medición.

- ***Sistema de control.***

Es aquel sistema en el cual el efecto deseado es logrado operando sobre una o más variables de entrada, hasta que la salida, la cual es una medida del efecto deseado, cae dentro de un rango de valores aceptables. Los instrumentos de medición son parte integral de un sistema de control, por lo que al conjunto se le suele llamar sistema de medición y control.

- ***Instrumentos en un sistema de control.***

Normalmente un sistema de control opera formando un lazo o bucle en el que se mide el valor de una variable, se compara con un punto de consigna o valor deseado (*set point*, SP) y se toma una acción de corrección de acuerdo con la desviación o error existente. A este esquema de control se le llama sistema de control por realimentación, o simplemente control a lazo cerrado.

El lazo de control puede ser abierto o cerrado. En un esquema de control de lazo abierto, no hay comparación entre el punto de consigna y la variable a controlar, o por lo menos no se realiza continuamente. En el esquema de control a lazo cerrado (ver Fig. 1.1), la diferencia entre el punto de consigna y la variable medida, genera un error el cual alimenta a un controlador que se encarga de minimizar el mismo manipulando la variable de control.

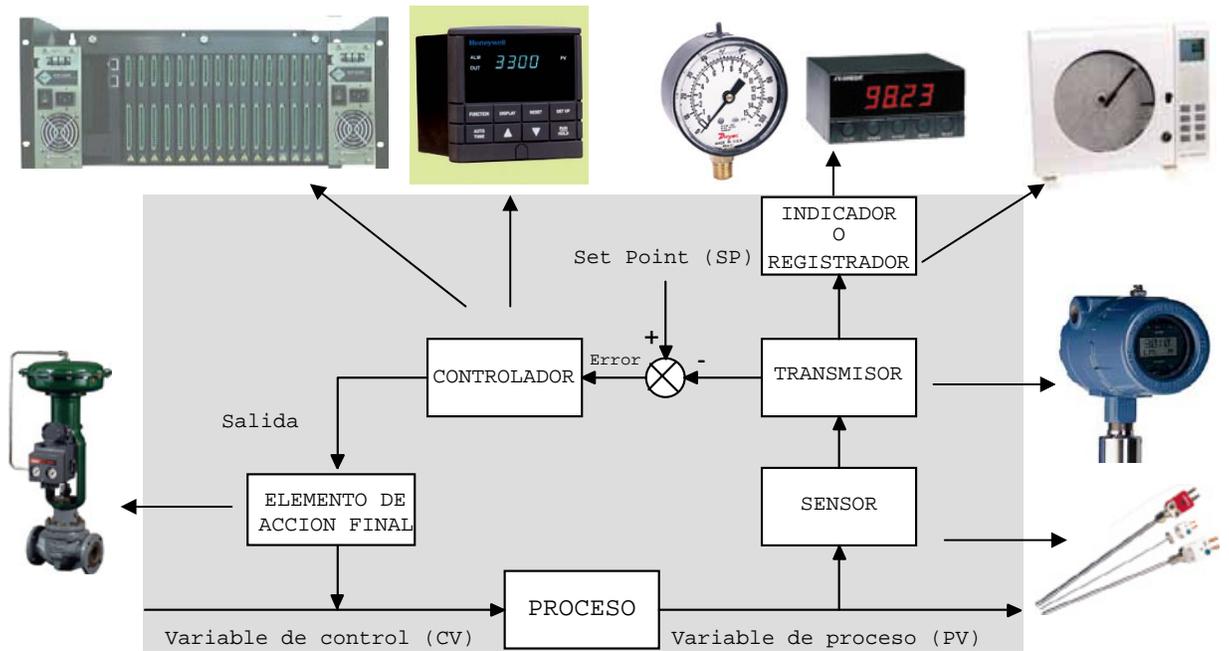


Figura 1.1. Control a lazo cerrado.

Como marco para el estudio de los diferentes instrumentos que forman parte de un sistema de control, se utilizará como referencia el lazo cerrado de control, sin embargo los instrumentos a estudiar pueden ser utilizados en cualquier otro esquema de control.

El estado actual de la tecnología es utilizar controladores digitales los cuales están en capacidad de ejecutar cientos de lazos de control. La mayoría de estos controladores tienen la capacidad de ser programados por los usuarios, e incorporan bloques de control y de cálculo previamente contruidos por el fabricante del controlador, los cuales pueden ser configurados por el usuario para implantar una gran variedad de estrategias de control. Existen también los denominados instrumentos “inteligentes”, los cuales están en capacidad de ejecutar algoritmos básicos de control, tales como bloques PID entre otros. Estos instrumentos se comunican unos con otros a través de los “Buses de campo”, eliminando la necesidad de utilizar controladores independientes.

1.3.- CLASES DE INSTRUMENTOS.

Se consideran dos clasificaciones básicas:

1. **Relacionada con la variable del proceso:** Esta clasificación corresponde específicamente al tipo de las señales medidas siendo independiente del sistema empleado en la conversión de la señal de proceso. Los instrumentos se dividen en instrumentos de caudal, nivel, presión, temperatura, densidad y peso específico, humedad y punto de rocío, viscosidad, posición, velocidad, pH, conductividad, frecuencia, fuerza, turbidez, etc.

2. **Relacionada con la función del instrumento:** Esta clasificación corresponde a la función que cumple el instrumento sin tomar en cuenta la señal medida, es decir, un indicador puede mostrar una señal de presión, temperatura, voltaje, etc., pero su clasificación funcional es como indicador.

Ambas clasificaciones son tomadas en cuenta para la elaboración de los DTI y otros documentos asociados a la instrumentación.

CAPÍTULO II

2.- ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN Y CONTROL

2.1.- TRANSDUCTOR.

Según la Sociedad de Instrumentación Sistemas y Automatización de Norteamérica (ISA); un transductor es un dispositivo que recibe energía de un sistema, y suministra energía, ya sea del mismo tipo o de un tipo diferente a otro sistema, de tal manera que ciertas características deseadas de la energía de entrada aparecen en la salida. Son transductores: un relé, un elemento primario, un transmisor, un convertidor I/P (intensidad de corriente a presión), etc.

El término transductor es muy amplio, ya que muchos instrumentos pueden ser clasificados como transductores, por esta razón tal expresión sólo debe ser empleada cuando un instrumento no caiga específicamente en alguna de las categorías que se definen a continuación. Generalmente los transductores transforman la señal recibida en una señal eléctrica o neumática, mucho más fácil de medir y transmitir.

Los transductores pueden clasificarse en:

- **Pasivos:** Son aquellos que necesitan una fuente de energía (alimentación), diferente de la señal de entrada. Ejemplo de transductores pasivos son: fotoresistencia y RTD.

- **Activos:** Son aquellos que generan una salida, aún sin una fuente de alimentación diferente de la propia señal de entrada. Ejemplo de transductores activos son: termopares y fotocélulas.

- **Digitales:** Son aquellos que generan salidas discretas en el tiempo (típicamente señales digitales binarias). Ejemplo de transductores digitales son: contador de eventos (turbina para medir caudal), disco codificador para medir nivel.

2.2. ELEMENTO PRIMARIO O SENSOR.

Un elemento primario es aquel que responde cuantitativamente a una medida, por ejemplo, un resorte responde a una fuerza según su elongación.

Un buen sensor debe perturbar lo menos posible la variable medida, de modo de no introducir errores en la medición. Así, un amperímetro debe poseer una baja impedancia de entrada, con el objeto de no producir una caída de voltaje que pueda modificar significativamente la corriente que circula por un circuito. Ejemplos de sensores son: termopares, RTD, fotoresistencias, resortes, flotador, etc.

Los elementos primarios de medición, los cuales son también transductores, pueden ser clasificados como:

- **Intrusivos:** Son aquellos que necesitan estar en contacto físico directo con el cuerpo o material sobre el cual se desea realizar alguna medición. Por ejemplo, un tubo Bourdon para medir presión, un

termopar para medir la temperatura de un fluido que circula por una tubería; en ambos casos el sensor está en contacto directo con la variable a medir.

- **Invasivos:** Son aquellos que no sólo necesitan estar en contacto físico directo con el cuerpo o material sobre cual se desea realizar alguna medición, si no que además pueden modificar significativamente (si son mal dimensionados) la dinámica del proceso. Los sensores invasivos, son también intrusivos. Ejemplos de sensores invasivos son: una placa orificio para medir caudal, un flotador para medir nivel, un termopar para medir la temperatura dentro de una tubería.
- **No intrusivos:** Son aquellos que no necesitan estar en contacto directo con el cuerpo o material sobre el cual se desea realizar alguna medición. Ejemplos de este tipo de sensores son: medidores de nivel por ultrasonido o por radar, pirómetros de radiación para medir temperatura.

2.3.- Receptores.

Es el nombre genérico que se les da a los instrumentos que reciben las señales provenientes de los transmisores. Desde este punto de vista, los registradores, controladores, e indicadores pueden ser instrumentos receptores, si los mismos están acoplados a un transmisor.

2.4. Transmisores.

Son instrumentos que captan la variable medida a través de un sensor, y la convierten en una señal estándar para su transmisión, la cual es sólo función de la variable medida.

En procesos relativamente complejos o peligrosos, se deben llevar las variables medidas hasta una sala de control, donde usualmente se encuentran los instrumentos controladores e instrumentos indicadores mediante los cuales un operador puede, de un vistazo, verificar el estado operativo del proceso, y realizar los ajustes necesarios. Normalmente la señales de salida de los sensores no tienen la suficiente potencia como para poder ser transmitidas a distancia (más de 50 m). En estos casos se deben utilizar transmisores que permitan enviar la señal desde el campo (proceso) hasta la sala de control.

Actualmente existen dos estándares para la transmisión en forma analógica de variables de proceso, los cuales son: 3 a 15 psi para señales neumáticas, y 4 a 20 mA para señales analógicas eléctricas. Existen, además, algunos estándares para transmisión digital de variables de proceso, los dos más conocidos y utilizados hasta la fecha son “Fieldbus Foundation” (ISA S50), y “Profibus”. La introducción de los denominados buses de campo, permite la implantación de redes de instrumentos con capacidad de control, permitiendo la disminución de los costos de conexión entre los instrumentos y el resto de los sistemas de automatización y control, al disminuir la cantidad de cables necesarios para lograr dicha conexión. En la Tabla 2.1 se indican los diferentes tipos de transmisores. En el siguiente capítulo se muestra en mayor detalle los elementos transmisores.

Tabla 2.1. Clasificación de los transmisores.

TIPO DE TRANSMISOR		SEÑAL DE SALIDA
NEUMÁTICOS		3 a 15 psig
ELÉCTRICOS	Analógicos	4 a 20 mA (estándar) 10 a 50 mA, 0 a 20 mA, 1 a 5 V, 0 a 10 V, -5 a 5 V.
	Inteligentes (analógicos, digitales e híbridos)	4 a 20 mA (estándar) HART™ (híbrido) “FIELDBUS FOUNDATION” (digital estándar)

HART™ es una marca registrada de Rosemount.

Con el uso de transmisores se pueden fabricar instrumentos receptores universales (ej.: indicadores, registradores, controladores), que están en capacidad de procesar la información de la variable medida indiferentemente del tipo de variable de proceso (flujo, presión, temperatura, etc.).

2.5.- Indicadores.

Son instrumentos utilizados para mostrar visualmente el valor presente de una cantidad medida. Generalmente los indicadores disponen de un índice o aguja, y de una escala graduada en la que puede leerse el valor de la variable directamente en unidades de ingeniería.

En la actualidad se utilizan instrumentos indicadores digitales, los cuales muestran un valor en forma numérica con dígitos. La ventaja de estos instrumentos radica en que se puede cambiar el rango de medición en forma automática (autorango). Los indicadores pueden incorporar el sensor, como en el caso de los manómetros de Bourdon, pueden aceptar diferentes tipos de sensores, como en el caso de algunos indicadores digitales de temperatura, o pueden conectarse a un transmisor.



Figura 2.1. Ejemplos de instrumentos indicadores. (Izq.) Analógico, (Der.) Digital.

2.6.- Registradores.

Son instrumentos que registran con un trazo continuo o a puntos el valor de una variable en función de otra (típicamente en función del tiempo). La información registrada es utilizada para análisis posteriores.

Son muchos los tipos de registradores, pueden ser circulares o de gráfico rectangular. Los registradores de gráfico circular suelen tener el gráfico de una revolución en 24 h, mientras que en el rectangular, la velocidad normal del gráfico es de 20 mm/h, aunque esta velocidad es configurable.

Los registradores pueden grabar una o más señales. Cada señal se graba con una plumilla colocada el extremo del brazo del registrador. En la actualidad existen registradores electrónicos, los cuales graban la información en memoria no volátil, para luego descargarla en un computador para su graficación y análisis.

2.7.- Convertidores.

Se utilizan para cambiar de una señal estándar a otro tipo de señal estándar. Básicamente existen dos tipos de convertidores: los convertidores P/I convierten una señal de entrada neumática (3 a 15 psi) a una señal eléctrica (4 a 20 mA), y los convertidores I/P que convierten la señal eléctrica en una señal neumática.

Los convertidores se utilizan en situaciones en las cuales existe instrumentación neumática en campo,

pero el sistema de control es electrónico; algunas válvulas de control también utilizan señales neumáticas en lugar de señales eléctricas.

2.8.- Controladores.

Son dispositivos que regulan la variable controlada (presión, nivel, temperatura, etc.) comparándola con un valor predeterminado o punto de consigna y ajustando la salida de acuerdo a la diferencia o resultado de la comparación a fin de ejercer una acción correctiva de acuerdo con la desviación.

La variable controlada la pueden recibir directamente como controladores locales, o bien indirectamente en forma de señal neumática, electrónica o digital procedente de un transmisor. En el siguiente capítulo se muestra en mayor detalle los controladores.

Los controladores no solamente se utilizan para esquemas de control regulatorio. También se utilizan para realizar estrategias de control secuencial. Cuando se utilizan para este último, reciben el nombre de controladores de lógica programable (PLC de las siglas en inglés).

2.9.- Elementos de acción final.

Los elementos de acción final son los instrumentos encargados de cambiar el valor de la variable de control (*control value*, CV) o variable manipulada para ejercer el control sobre la variable de proceso. Es decir, el elemento de acción final recibe la señal del controlador y actúa sobre el proceso. Ejemplos de elementos de acción final son válvulas para control de flujo, tiristores para control de corriente eléctrica, motores de paso para control de posición.

Dentro de los elementos finales de control se tienen las válvulas de control, los elementos finales electrónicos (amplificador magnético saturable, rectificadores controlados de silicio, válvula inteligente), bombas dosificadoras, actuadores de velocidad variable y relés. En el capítulo 9 se muestra en mayor detalle las válvulas de control.

2.10.- Interruptores de límite.

Son instrumentos que captan el valor de cierta variable de proceso, y cambian de estado cuando la variable excede cierto valor. Por ejemplo, un flotante en un tanque, el cual causa el cierre de la válvula de entrada de fluido al tanque, puede ser considerado un interruptor de límite. En algunas ocasiones los interruptores de límite se pueden utilizar como controladores “ON/OFF”. Por ejemplo, el denominado “Termostato” de un sistema de aire acondicionado, se encarga de activar el compresor cuando la temperatura es mayor a cierto valor y de apagarlo cuando es inferior a otro límite.



EJERCICIOS.

PROBLEMA 2.1.

Un instrumento que capta la presión en el fondo de un tanque de agua y envía una señal por un lazo de corriente de 4 a 20 mA, proporcional al nivel de agua en el tanque es un:

- a.** Transductor de presión.
- b.** Transmisor de nivel.
- c.** Transmisor de presión
- d.** Sensor de nivel.
- e.** Transductor de nivel.
- f.** Ninguna de las anteriores.

PROBLEMA 2.2.

Un instrumento utilizado para dar la orden de encendido de una bomba de agua para mantener la presión de un sistema de alimentación de agua a un edificio (sistema hidroneumático) es considerado un:

- a.** Transductor de presión.
- b.** Registrador de presión.
- c.** Transmisor de presión
- d.** Controlador de presión.
- e.** Indicador de presión.
- f.** Interruptor de alta presión.

De la lista anterior indique cómo sería considerado el instrumento, si el mismo es utilizado para activar una alarma por alta presión en el sistema.

CAPÍTULO III

3.- TRANSMISORES Y CONTROLADORES

3.1.- Transmisores.

Existen varios tipos de señales de transmisión: neumáticas, electrónicas, digitales, hidráulicas y telemétricas. Las más empleadas en la industria son las tres primeras, las señales hidráulicas se utilizan ocasionalmente cuando se necesita una gran potencia y las señales telemétricas se emplean cuando hay una distancia de varios kilómetros entre el transmisor y el receptor.

3.1.1.- Transmisores neumáticos.

Los transmisores neumáticos envían una señal de salida en forma de aire a presión, la cual varía linealmente con la señal de entrada. El estándar de transmisión es una presión comprendida entre 3 a 15 psig (0,2 a 1 bar), normalizado según SAMA. La operación básica del transmisor neumático está basado en el mecanismo tobera-obturador ilustrado en la Figura 3.1.

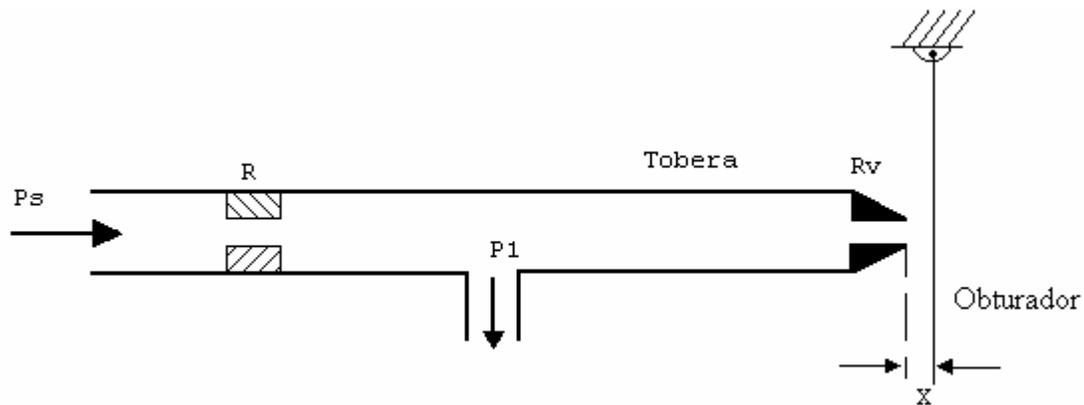


Figura 3.1. Sistema tobera – obturador.

Los transmisores neumáticos fueron los primeros transmisores que se hicieron de aplicación común en el área industrial, y hoy en día son cada vez menos utilizados. Solamente se utilizan como reemplazo en instalaciones en las que aún se utilizan controladores neumáticos, o en situaciones donde no se dispone de energía eléctrica, pero sí se dispone de un gas a presión que permita la utilización de estos instrumentos. Por ejemplo en estaciones de recolección de petróleo crudo (estaciones de flujo), se puede utilizar instrumentación neumática como respaldo de la instrumentación electrónica en caso de pérdida de la energía eléctrica. En estas instalaciones se toma directamente el gas que sale de los pozos de producción de crudo para limentar el sistema neumático. Algunas de las características de los transmisores neumáticos son:

- Las variaciones en la señal de alimentación, influyen en la señal de salida, ocasionando errores significativos en la señal transmitida.
- Las vibraciones mecánicas dan origen a pulsaciones en la señal transmitida.
- La señal transmitida tiene un alcance máximo de 60 m.
- Son mucho más inexactos que los transmisores eléctricos.
- Se debe tener un buen control de la calidad de aire (sobre todo la humedad y partículas en suspensión), de modo de evitar el deterioro y taponamiento del mecanismo interno de los instrumentos.

Es importante aclarar que aún hoy en día, se utilizan con gran frecuencia señales neumáticas para el accionamiento de válvulas de control, y por lo tanto una gran cantidad de plantas modernas disponen de un sistema de suministro de aire de instrumentos.

3.1.2.- Transmisores eléctricos.

Los transmisores eléctricos se clasifican en dos grandes grupos: los analógicos y los inteligentes. En el primer caso están conformados por circuitos analógicos, y en el segundo caso están conformados por circuitos digitales basados en microprocesador.

La señal estándar para la transmisión eléctrica de variables de proceso es el lazo de corriente de 4 a 20 mA tal como lo establece la norma ANSI/ISA S50.1.

Las características principales del lazo de corriente de 4 a 20 mA son las siguientes:

- Capacidad de transmitir la señal a distancias de hasta 1 km o más, dependiendo de la impedancia del cable.
- La existencia de un cero "vivo" (4 mA), permite la posibilidad de detección de corte del lazo.
- La transmisión en corriente directa (CD) que permite filtrar más fácilmente las perturbaciones.
- Mayor velocidad de respuesta que los transmisores neumáticos.

El diagrama en bloque de un transmisor eléctrico con señal analógica de salida de 4 a 20 mA es mostrado en la Figura 3.2.

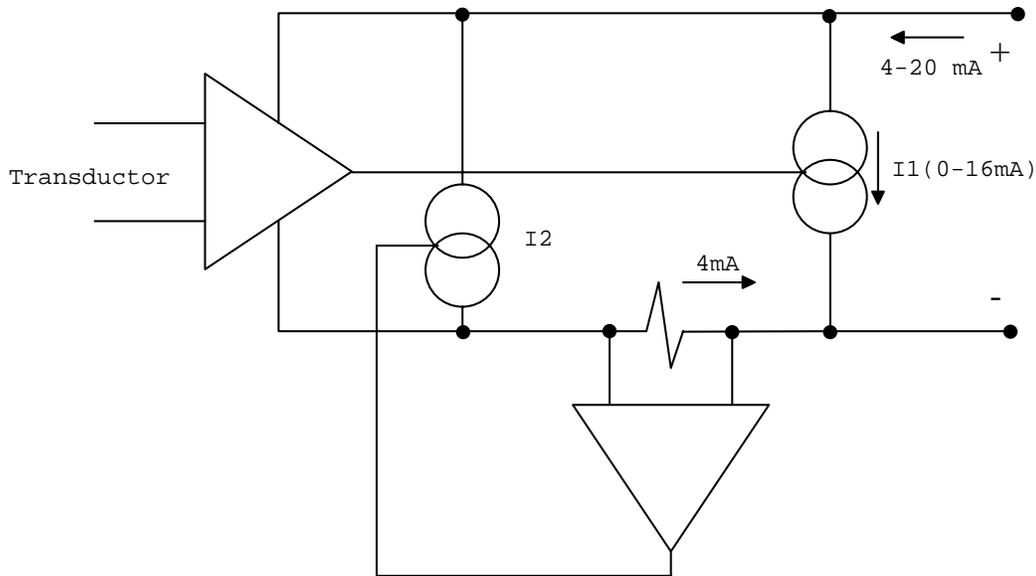


Figura 3.2. Transmisor analógico a dos hilos.

Las fuentes de corriente I_1 , I_2 son controladas por voltaje; I_1 es controlada directamente por la señal proveniente del transductor/amplificador; I_2 es fijada de modo que la corriente necesaria para alimentar al transmisor y a la propia fuente I_2 sea de 4 mA.

El rango de la señal de corriente se seleccionó deliberadamente con supresión del cero (la corriente mínima es 4 mA, en lugar de 0mA) de modo de detectar rupturas en el cable que envía la señal (si el cable se rompe la corriente recibida será 0 mA).

3.1.2.1.- Transmisores analógicos.

Los transmisores analógicos son los de uso más difundido en la actualidad y sus características fundamentales son:

- Capacidad de calibración en múltiples rangos de medición. Usualmente al momento de la adquisición de el transmisor se especifica el rango de medición para el cual va a ser utilizado, lo que permitirá la precalibración en fábrica del instrumento. Sin embargo, estos transmisores pueden ser recalibrados por el usuario en cualquier rango válido de medición siguiendo los procedimientos indicados por el fabricante.
- Pueden ser reparados con relativa facilidad. La mayoría de estos transmisores son de construcción modular (tienen circuitos separados para la sección de amplificación, transductor, lazo de corriente, etc.) de modo que la reparación se puede lograr rápidamente mediante la sustitución del módulo dañado.
- Dependiendo de la variable medida, pueden tener capacidad de aceptación de un amplio espectro de sensores. Por ejemplo, en el caso de los transmisores de temperatura pueden aceptar sensores tales como: termopares de varios tipos (J, K, T, R, S, E, B) o RTD de diferentes características (platino, níquel y cobre, con varias resistencias nominales).
- Capacidad para ser alimentados a través del propio lazo de corriente de transmisión de la señal analógica (conexión a dos hilos). También existen modelos con alimentación de la línea (conexión a

cuatro hilos).

- La velocidad de respuesta es de 2 a 5 veces superior a las de los transmisores digitales. Igualmente el tiempo de recuperación debido a una falla en la alimentación del transmisor es menor que el caso de los transmisores digitales.
- Buena exactitud pudiéndose obtener hasta $\pm 0,05\%$ del alcance calibrado.
- Capacidad de aislamiento entre la circuitería de entrada y la de salida. Esta capacidad está incluso presente en los transmisores alimentados a través del propio lazo de transmisión de la señal analógica. Se logra mediante la utilización de convertidores AC/DC y de transformadores que suministran el aislamiento galvánico.
- Capacidad de protección de la circuitería interna contra picos y respuestas transitorias.
- Debido a que la calibración del rango de medición es lograda usualmente a través de dispositivos electro-mecánicos (potenciómetros), este tipo de instrumento es propenso a inestabilidad en el tiempo (*drift*) por lo que generalmente requieren recalibración periódica.
- Cumplen con el estándar ISA [S50.1] para transmisión de señales analógicas, lo que asegura la compatibilidad con cualquier instrumento receptor que cumpla igualmente con dicho estándar.

3.1.2.2.- Transmisores inteligentes.

Se denomina transmisor inteligente a aquel que incorpora circuitería digital basada en microprocesador, y que para el procesamiento de la señal proveniente del sensor utiliza *software* en lugar de *hardware*. Existe una gran variedad de transmisores inteligentes, cuya diferencia principal consiste en el mecanismo que utilizan para la transmisión de la señal. A continuación se describen las características de cada uno de ellos.

- ***Transmisores inteligentes con comunicación digital:*** También suelen denominarse simplemente transmisores digitales. En este tipo de transmisor la variable de proceso es transmitida digitalmente y codificada de acuerdo a un protocolo de comunicación ya sea estándar (por ejemplo "FIELD BUS FOUNDATION") o del propio fabricante del transmisor. Entre las características más importantes de este transmisor encontramos:

- Capacidad para operar en cualquier rango válido de medición. Los rangos de medición son configurables por *software* por el propio usuario, tanto en forma local (a través de un terminal manual portátil) como en forma remota (desde la sala de control) a través del canal de comunicación digital. Estos transmisores también pueden hacer el cambio automático del rango de medición en caso de que la variable se salga del rango.
- La posibilidad del cambio del rango de medición (en el sitio) sin necesidad de recalibrar el instrumento disminuye los tiempos de parada del proceso, ya que en el caso de los transmisores analógicos una buena calibración sólo se logra en el taller de instrumentación, lo que hace necesario la parada momentánea del proceso o la operación a ciegas del mismo.
- Dependiendo de la variable medida, pueden ser utilizados para operar con una gran cantidad de sensores sin necesidad de cambios en el *hardware* del transmisor.
- Excelente exactitud, la cual es típicamente mejor a $\pm 0,05\%$ del alcance calibrado.

- Excelente estabilidad debido a que no se requieren cambios o ajustes en el *hardware* para configurar el rango de medición y no poseen dispositivos (ej.: potenciómetros) sujetos a deriva en el tiempo. Esto ocasiona poca o ninguna necesidad de recalibración del instrumento.
- Incorporan mecanismos de caracterización propios de cada transmisor. La caracterización permite compensar el error debido a las diferencias entre las condiciones (generalmente temperatura ambiente) a las cuales fue calibrado el instrumento en fábrica y las condiciones actuales de trabajo. Esta característica permite la instalación directa del transmisor en campo sin necesidad de recalibración del mismo.
- Compensación de las no linealidades del sensor. Los transmisores pueden tener grabado en memoria tablas de conversión o utilizar polinomios de aproximación de la curva característica del sensor.
- Capacidad de auto-diagnóstico que le permite la identificación y el reporte (vía comunicación digital) de fallas tanto a nivel del sensor como del transmisor. Ésto facilita la labor de mantenimiento y acorta el tiempo necesario para la ejecución del mismo, incrementando la disponibilidad general del sistema de control y/o supervisión asociado al proceso.
- Mayor seguridad de operación en zonas clasificadas. Para la comunicación digital no es necesario el uso de las señales eléctricas riesgosas para la operación en ambientes explosivos. En su lugar, se pueden emplear enlaces de fibra óptica o señales infrarrojas mucho más seguras en este tipo de situación. Adicionalmente, este tipo de señales no están expuestas a interferencia electromagnética, descargas eléctricas o corto circuitos, haciendo la transmisión mucho más segura desde el punto de vista de integridad de los datos.
- Ahorro de costos en el cableado. Los transmisores digitales utilizan un *bus* de datos de dos hilos conductores, el cual puede ser compartido por un grupo de transmisores que utilicen el mismo protocolo; de esta forma no se hace necesario el cableado individual de cada transmisor.
- En general, la velocidad de respuesta de un transmisor digital es más lenta que la de un transmisor analógico, ya que la señal proveniente del sensor necesita ser digitalizada y procesada antes de ser enviada. Por otra parte, cuando varios transmisores comparten un mismo *bus* de comunicaciones se debe hacer un barrido a cada uno de ellos; el tiempo de barrido completo de todos los transmisores aumenta con el número de transmisores. En una gran cantidad de aplicaciones estos tiempos de respuesta (aún en el caso de varios transmisores conectados a un *bus*) son despreciables; sin embargo, en algunos lazos de control los transmisores pueden tener una velocidad de respuesta tan lenta que pueda afectar la estabilidad del lazo de control. Es por ello que éste es un parámetro que debe ser considerado al momento de la selección del tipo de transmisor a utilizar.
- La incorporación de los estándares de comunicación digital para instrumentos a sido muy lenta, debido en parte a la lucha comercial entre diversos fabricantes por imponer el estándar que mas los favorezca, y en parte a que los usuarios tienden a utilizar en sus procesos tecnología probada, aventurándose en pocas ocasiones a nuevas tecnologías. La lenta aceptación de los buses de campo, ha ocasionado una brecha tecnológica muy amplia entre las redes de datos a nivel comercial y las redes de datos a nivel industrial.
- Al igual que los transmisores analógicos, pueden disponer de aislamiento de la entrada con la salida, y también cuentan con protección contra picos y cambios transitorioa de voltaje y corriente.
- La señal transmitida tiene un mayor alcance que en el caso de los transmisores analógicos (en algunos modelos puede llegar hasta 10 km).
- Los transmisores están en capacidad de ejecutar algoritmos y funciones de control, como por

ejemplo, un algoritmo Proporcional-Integral-Derivativo (PID), y comunicarse con una válvula inteligente (que utilice el mismo protocolo), sin necesidad de utilizar un controlador adicional.

- **Transmisores analógicos inteligentes:** En este caso el instrumento transmite la señal de las variables de proceso en forma analógica pero la circuitería interna es inteligente (basado en microprocesador), lo cual permite ciertas ventajas como son la configuración por *software* del rango de medición y tipo de sensor, compensación de las no linealidades del sensor, caracterización del transmisor, y en general, todas las características indicadas para el transmisor digital no relacionadas con la transmisión digital de la información.

Estos transmisores son totalmente compatibles con los transmisores analógicos convencionales, por lo que pueden ser utilizados para la sustitución de los mismos sin necesidad de cambios en el cableado o instrumentación asociada. Los transmisores analógicos inteligentes son menos exactos que los transmisores digitales, ya que el proceso de reconversión de la señal digital a analógica nuevamente introduce un error adicional no presente en el transmisor digital.

- **Transmisores híbridos:** Éstos son transmisores inteligentes con capacidad de comunicación tanto digital como analógica. Usualmente, la variable de proceso es transmitida en forma analógica estándar mientras que la comunicación digital es utilizada para intercambiar información de configuración y diagnóstico del instrumento, y es lograda a través del mismo par de cables por el cual se transmite la señal analógica.

Estos transmisores combinan las ventajas de los transmisores digitales y los analógicos y pueden utilizar el cableado existente de los transmisores analógicos convencionales. Si se requiere la capacidad de comunicación digital, solamente se necesita de un acoplador adicional conectado al lazo de corriente analógico. Los terminales portátiles de configuración pueden ser inclusive conectados directamente al lazo de corriente porque generalmente contienen incluido el *hardware* de acople.

Es de notar que la variable de proceso también puede ser transmitida en forma digital siendo un valor más exacto que el valor analógico. Este tipo de transmisor se tiende a utilizar en las nuevas instalaciones, ya que permite integrar una buena parte de las ventajas de la comunicación digital (diagnóstico y mantenimiento) y mantiene la información vital (variable de proceso) dentro del estándar internacional de mayor aceptación (4 a 20 mA), por lo tanto compatible con una amplia gama de instrumentos asociados al lazo de control.

3.1.2.3.- Esquemas de conexión de los transmisores eléctricos.

En cuanto al esquema de conexión de la salida y la fuente de alimentación del transmisor, existen tres tipos de transmisores: a dos hilos, a tres hilos y a cuatro hilos (ver Fig. 3.3).

- **Transmisores a dos (2) hilos:** En este caso, la fuente de alimentación está conectada a la misma salida del transmisor (ver Fig. 3.3 (a)). Los transmisores a dos hilos se caracterizan porque tienen un bajo consumo de potencia (inferior a 50 mW) y la salida sigue el estándar de lazo de corriente de 4 a 20 mA.

La gran ventaja de los transmisores a dos hilos es que requieren menos cableado que los de 4 hilos, porque la alimentación y la señal de salida comparten el mismo par de cables, y adicionalmente consumen menos potencia. Igualmente los transmisores a dos hilos cuestan generalmente menos que los transmisores a 4 hilos.

Bajo ciertas condiciones no se pueden utilizar transmisores a 2 hilos, siendo algunas de ellas:

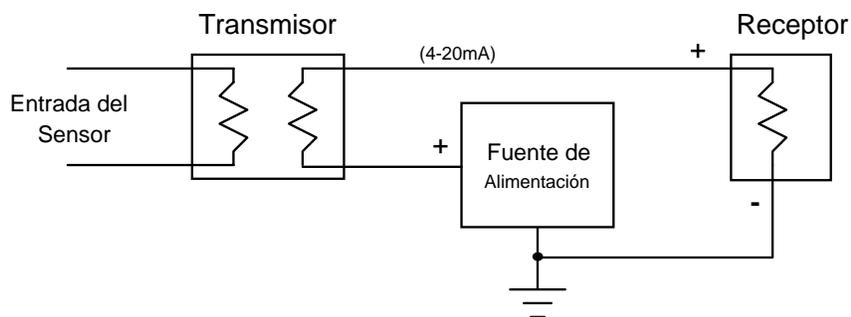
- No existe disponibilidad en campo de fuente de alimentación DC en el rango de voltaje requerido por los transmisores a 2 hilos (típicamente de 12 Vdc a 50 Vdc).
- Cuando el instrumento receptor de la señal proveniente del transmisor trabaja en un rango en el cual el cero de la señal recibida corresponde a 0 V o a 0 mA (ej.: el receptor no acepta señales de 4 a 20 mA y en su lugar acepta señales de 0 a 5 V).

En los transmisores a dos hilos puede existir aislamiento eléctrico entre la señal de entrada proveniente del sensor y la señal de salida y/o alimentación. A este tipo de aislamiento se le denomina entrada aislada.

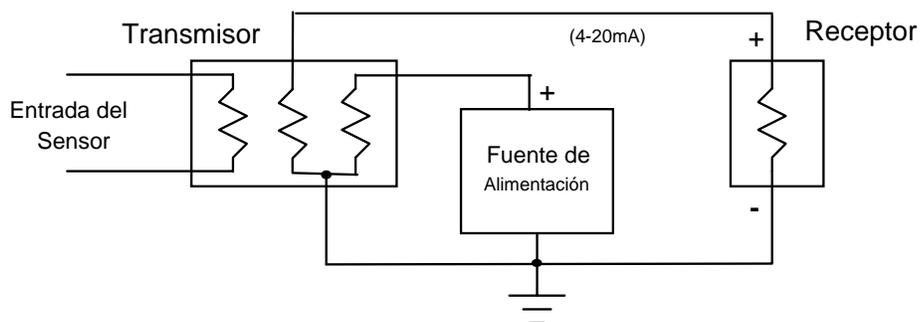
- **Transmisores a tres (3) hilos:** Cuando el transmisor consume mayor potencia que la que puede ser suplida a través del propio lazo de corriente de salida, el transmisor debe utilizar un tercer hilo justamente para llevar esa corriente extra que le permita funcionar. Se debe entonces utilizar un esquema de conexión a tres o cuatro hilos (ver Fig. 3.3 (b)). En el esquema de conexión a tres hilos, una señal común es utilizada entre la fuente de alimentación y el lazo de transmisión analógico. En este esquema de conexión la fuente de alimentación debe ser CD al igual que la señal transmitida. En el esquema de conexión a tres hilos puede existir aislamiento eléctrico entre la señal de entrada y la de salida, y/o la fuente de alimentación (entrada aislada).

- **Transmisores a cuatro (4) hilos:** Los transmisores a cuatro hilos utilizan dos cables para la conexión de la fuente de alimentación, la cual es usualmente de 120 Vca, y dos cables para transmitir la señal (ver Fig. 3.3 (c)). En el esquema de conexión a cuatro hilos puede existir un aislamiento eléctrico total entre la señal de entrada, la de salida y la fuente de alimentación. En este caso se dice que el transmisor puede tener cualquiera de las siguientes combinaciones: entrada aislada, salida aislada, alimentación aislada y totalmente aislado.

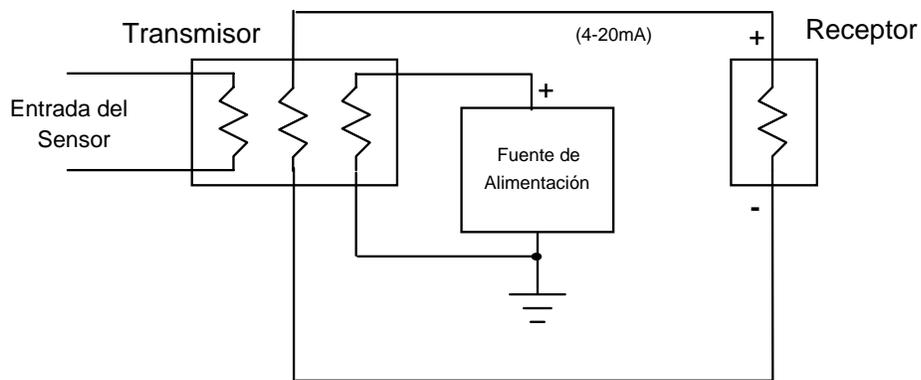
Las normas internacionales también catalogan a los transmisores de acuerdo a la máxima impedancia del lazo que deben estar en capacidad de soportar como mínimo para ciertos voltajes de alimentación de la fuente. En este sentido, la norma ISA S50.1 distingue tres tipos de transmisores, los cuales se muestran en la Tabla 3.1.



(a) Conexión a dos hilos.



(b) Conexión a tres hilos.



(c) Conexión a cuatro hilos.

Figura 3.3. Esquemas de conexión de los transmisores. (a) Conexión a dos hilos. (b) Conexión a tres hilos. (c) Conexión a cuatro hilos.

Tabla 3.1. Tipos de transmisores según la Norma ISA S50.

CLASE	L	H	U
Resistencia del lazo (Ω)	300	800	300 a 800
Voltaje de alimentación (V)	23	32,7	23 a 32,7

El tipo de transmisor se forma indicando el número de hilos para su conexión y la máxima impedancia de lazo que debe estar en capacidad de manejar como mínimo. Por ejemplo un transmisor clasificación 2H (el primer número indica el número de cables necesarios para la conexión), es un transmisor a dos hilos, el cual debe ser capaz de suministrar la salida deseada (4 a 20 mA) cuando la impedancia del lazo es de al menos 800 Ω y el voltaje de la fuente de alimentación es de 32,7 V.

3.2.- Controladores.

Existen fundamentalmente dos tipos de controladores, los continuos o de regulación y los secuenciales. Los controladores continuos están constantemente comparando el SP con la variable medida o variable del proceso (*process value*, PV) y generan un salida (*output*) que actúa sobre el elemento de acción final.

La función de los controladores de secuencia es mantener el orden en el que se deben ejecutar las acciones en un proceso. En la actualidad existen controladores que integran las funciones de control continuo y secuencial en un solo instrumento (ej.: existen controladores lógicos programables (PLC de las siglas en inglés) que contiene funciones para control continuo).

A continuación se hace una descripción breve del esquema de funcionamiento de algunos controladores de uso muy difundido en la industria.

3.2.1.- Controlador todo o nada (*On-Off*).

En este tipo de controlador, la salida varía entre dos posiciones extremas (todo o nada), de acuerdo a si la PV es mayor o menor al SP. Este controlador tiene usualmente una banda diferencial o zona neutra dentro de la cual la salida se mantiene en su valor actual. La banda diferencial permite minimizar la frecuencia de oscilación de la salida pero aumenta la amplitud de la misma. Tanto el SP como la banda diferencial son parámetros ajustables en el controlador todo o nada. Ejemplos de controladores todo o nada son los muy difundidos termostatos, empleados para controlar temperatura en sistemas de aire acondicionado, termos, calentadores de ambiente, etc. En la Figura 3.4 (a) se muestra un ejemplo de la acción de un controlador todo o nada con banda diferencial.

3.2.2.- Control flotante de velocidad constante.

Éste es un caso de control todo o nada en que el elemento de acción final (ej.: válvula) no se mueve bruscamente entre sus dos posiciones extremas, si no que lo hace lentamente a una velocidad constante, independiente del valor de la señal de error. Estos controladores también suelen incorporar un mecanismo de ajuste de la banda diferencial o zona neutra dentro de la cual la salida del controlador no varía.

Debe notarse que en este caso, el elemento de acción final puede estar en posiciones intermedias entre sus valores máximo y mínimo. En la Figura 3.4. (b) puede observarse un ejemplo de este tipo de acción de control.

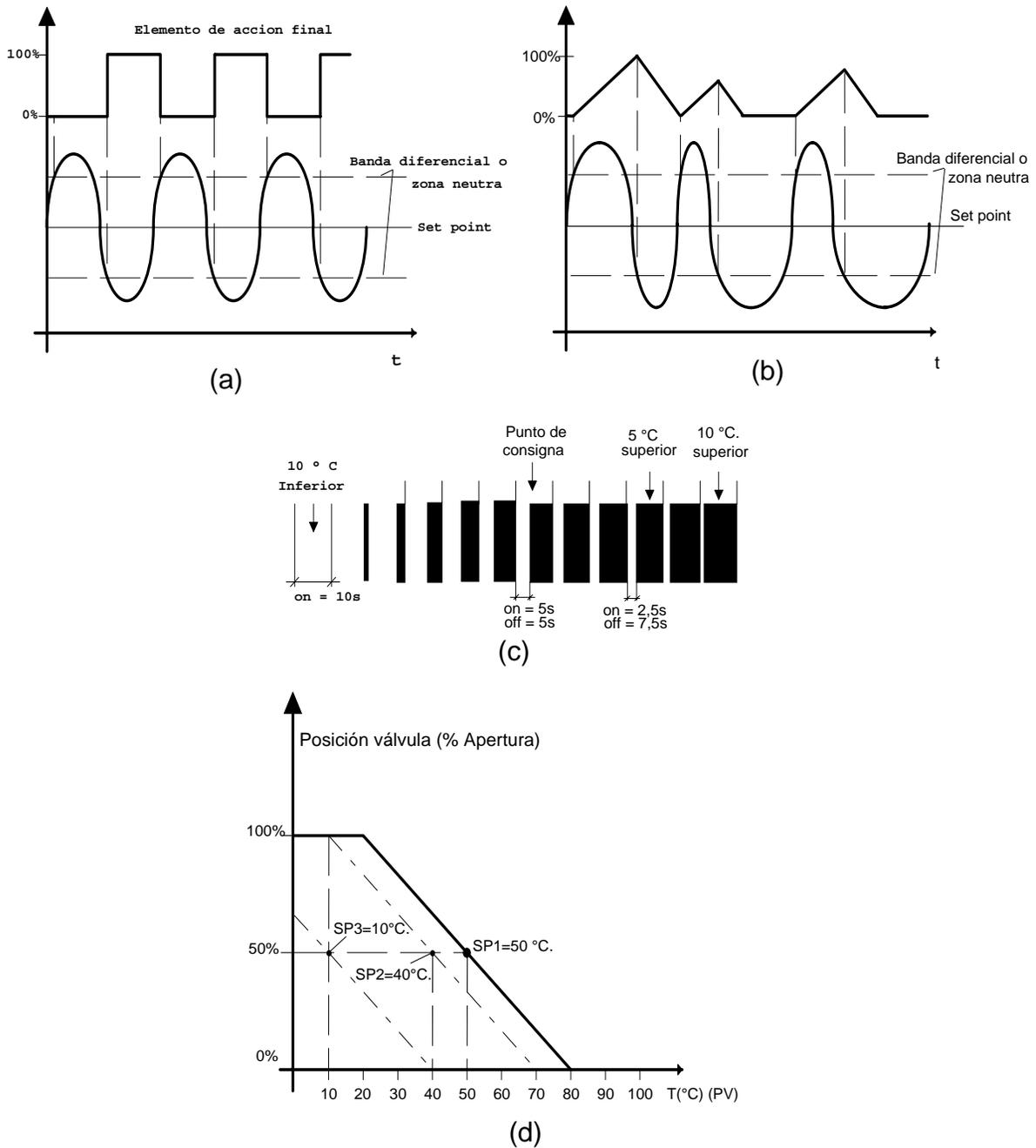


Figura 3.4. Esquemas de control. (a) Control On-Off con banda diferencial. (b) Control flotante de velocidad constante. (c) Control proporcional de tiempo variable.

3.2.3.- Control proporcional de tiempo variable.

Éste es otro caso de control todo o nada en el cual la posición promedio del elemento de acción final varía en forma proporcional a la señal de error dentro de un marco de tiempo preestablecido, es decir, el tiempo en *On* más el tiempo en *Off* de la salida es constante, pero la relación entre dichos tiempos varía en forma proporcional a la señal de error. En la Figura 3.4 (c) se muestra el esquema utilizado por este tipo de controlador.

A este tipo de control también se le llama control por ciclos y se utiliza sólo con elementos de acción final eléctricos (ej.: tiristores), fundamentalmente para el control de temperatura en hornos. En estos controladores se pueden ajustar el tiempo de duración del ciclo de control y la denominada banda proporcional (BP) necesaria, la cual representa el porcentaje de variación de la variable controlada, para provocar una variación entre sus dos posiciones extremas del elemento de acción final.

3.2.4.- Control de salida continua.

En este esquema de control, la salida del controlador es una función continua en el tiempo y varía de acuerdo a la señal de error y a un algoritmo de control preestablecido.

- **Controlador proporcional.**

En este caso la salida del controlador varía continuamente y en forma proporcional a la señal de error dentro de la banda proporcional. Fuera de la banda proporcional, el elemento de acción final se mantiene en una de sus dos posiciones extremas. En la Figura 3.4 (d) se observa un ejemplo de la acción del controlador proporcional.

La ecuación que define el comportamiento del controlador proporcional es:

$$\text{output} = (\text{PV}-\text{SP}) \cdot K + \text{bias} \quad (3.1)$$

donde:

output = Salida del controlador.

(PV-SP) = Señal de error.

K = Constante de proporcionalidad o ganancia.

Bias = Valor al cual se desea la salida cuando el error es cero.

La ganancia del controlador es la relación entre la variación de la salida (ΔS) con respecto a las variaciones en la entrada (error, ϵ) que generan dicha variación dentro de la banda proporcional, esto es:

$$K = \Delta S / \Delta \epsilon \quad (3.2)$$

La relación que existe entre la banda proporcional y la ganancia es:

$$\%BP = 100\% / K \quad (3.3)$$

Generalmente, la banda proporcional de un controlador varía entre 1 y 500%.

Si la ganancia es positiva, se dice que el controlador es de acción directa, y si es negativa, se dice que es de acción inversa. En un controlador de acción directa se cumple que a medida que la variable de proceso aumenta, la salida del controlador aumenta, al contrario sucede en un controlador de acción inversa.

Una característica indeseada de los controladores proporcionales es el *offset* o error en estado estacionario, el cual es una señal de error la cual no puede ser corregida por el controlador proporcional, y se presenta al haber una variación en la carga del proceso.

- **Controlador proporcional integrativo (PI).**

En este caso el algoritmo de control incorpora un componente que integra la señal de error en el tiempo, de modo de eliminar el *offset* a la salida del controlador.

La ecuación que define la salida del controlador PI es:

$$\Delta S = K_p \cdot \varepsilon + K_i \cdot \int \varepsilon \cdot dt \quad (\text{con ganancias independientes}) \quad (3.4)$$

$$\Delta S = K_p \cdot \varepsilon + \left(\frac{K_p}{\tau_i} \right) \cdot \int \varepsilon \cdot dt \quad (\text{estándar}) \quad (3.5)$$

donde:

K_p = Ganancia proporcional (parámetro ajustable).

K_i = Ganancia integral (parámetro ajustable) (repeticiones/min).

τ_i = Tiempo de acción integral.

El tiempo de acción integral es el intervalo de tiempo en el cual, ante una señal de entrada en escalón, la parte de la señal de salida debida a la acción integral, iguala a la parte debida a la acción proporcional.

- **Controlador proporcional-integrativo-derivativo (PID).**

En este caso se ha añadido un componente derivativo a la acción de control. Dicho componente actúa de forma tal que produce una salida de acuerdo a la velocidad de variación de la señal de error, es decir, proporcional a la derivada del error en el tiempo.

La ecuación que define a la salida del controlador PID es:

$$\Delta S = K_p \cdot \varepsilon + \left(\frac{K_p}{\tau_i} \right) \cdot \int \varepsilon \cdot dt + \tau_d \cdot K_p \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.6)$$

donde:

τ_d = Tiempo de acción derivada (min).

El tiempo de acción derivada se define como el intervalo de tiempo necesario para que la señal de salida debida a la acción derivativa iguale a la señal de salida debida a la acción proporcional, para una entrada en rampa.



EJERCICIOS.

PROBLEMA 3.1.

Los controladores automáticos operan en la diferencia entre el SP y la Vm, la cual es llamada:

a. *Offset.*

c. Error.

b. Bias.

d. Realimentación.

PROBLEMA 3.2.

Un controlador de dos posiciones (*on –off*) siempre:

- a.** Controla con un *offset* fijo.
- b.** Controla alrededor de un punto.
- c.** Automáticamente ajusta su tiempo integral.
- d.** Requiere un ajuste preciso.

PROBLEMA 3.3.

La ganancia y la banda proporcional:

- a.** Se relacionan reciprocamente.
- b.** Son dos modos diferentes de control.
- c.** Se ajustan independientemente una de la otra.
- d.** Son funciones de control que se calibran en unidades de tiempo.

CAPÍTULO IV

4.- SIMBOLOGÍA NORMALIZADA ISA PARA LA ELABORACIÓN DE PLANOS DE INSTRUMENTACIÓN DE PROCESOS

Para la elaboración de planos de instrumentación de procesos, también llamados Diagramas de Tuberías e Instrumentación (DTI, o P&ID de la siglas en inglés), se debe utilizar nomenclatura y simbología normalizada de modo que el plano pueda ser entendido por cualquier persona que conozca dicha normativa.

La institución que ha normalizado la designación de y representación de instrumentos en planos es la ISA, para lo cual ha publicado varias normas, entre ellas: la norma ISA S5.1 sobre designación y representación de instrumentos; la norma ISA S5.2 sobre diagramas de lógica binaria para operaciones de procesos; y la norma ISA S5.3 sobre símbolos gráficos para control distribuido e instrumentación compartida. A continuación se muestra un extracto de la norma ISA S5.1.

4.1.- Normativa para la designación de instrumentos.

Cada instrumento se debe identificar con un sistema de letras que lo clasifique funcionalmente. La identificación del lazo al cual pertenece el instrumento se designa agregándole un número al sistema de letras. Generalmente este número es el mismo para todos los instrumentos que forman parte del mismo lazo de control. Ocasionalmente se le agrega un sufijo para completar la identificación del lazo.

El número de identificación del instrumento (TAG) puede incluir información codificada para designar el área de la planta. En la Figura 4.1 se muestra la metodología para la formación del nombre de un instrumento en un P&ID. El significado de las letras que conforman el TAG se muestra en la Tabla 4.1.

PRIMERA LETRA		LETRAS SUCESIVAS			LAZO	
Variable medida	Modificación	Lectura pasiva	Salida	Modificación	Número del lazo	Sufijo adicional
Identificación funcional					Identificación del lazo	
Nombre del instrumento (<i>TAG name</i>)						

Figura 4.1. Identificación representativa de un instrumento.

El número de letras funcionales para un instrumento debe ser mínimo, no excediendo de cuatro. Para ello conviene:

1. Disponer las letras en subgrupos.
2. En un instrumento que indica y registra la misma variable medida puede omitirse la letra I.

3. Los lazos de instrumentos de un proyecto o secciones de un proyecto deben identificarse con una secuencia única de números. Éste puede empezar con el número 1 o cualquier otro que pueda incorporar información codificada.
4. Si el lazo dado tiene más de un instrumento con la misma identificación funcional, es preferible añadir un sufijo.

Tabla 4.1. Letras de identificación de instrumentos.

PRIMERA LETRA		LETRAS SUCESIVAS		
Variable medida	Modificación	Lectura pasiva	Salida	Modificación
A Análisis	--	Alarma	--	--
B Llama	--	Libre	Libre	Libre
C Conductividad	--	--	Control	--
D Densidad	Diferencial	--	--	--
E Tensión (fem)	--	Elemento primario	--	--
F Caudal	Relación	--	--	--
G Calibre	--	Vidrio	--	--
H Manual	--	--	--	Alto
I Corriente	--	Indicación	--	--
J Potencia	Exploración	--	--	--
K Tiempo	--	--	Estación de control	--
L Nivel	--	Luz piloto	--	Bajo
M Humedad	--	--	--	Medio
N Libre	--	Libre	Libre	Libre
O Libre	--	Orificio	--	--
P Presión	--	Punto de prueba	--	--
Q Cantidad	Integración	--	--	--
R Radiactividad	--	Registro	--	--
S Velocidad	Seguridad	--	Interruptor	--
T Temperatura	--	--	Transmisor	--
U Multivariable	--	Multifunción	Multifunción	Multifunción
V Viscosidad	--	--	Válvula	--
W Peso	--	Vaina	--	--
X Sin clasificar	--	Sin clasificar	Sin clasificar	Sin clasificar
Y Libre	--	--	Relé, convertidor	--
Z Posición	--	--	Elemento final (sin clasificar)	--

☺ **EJEMPLO 4.1.**

Algunos de nombres de instrumentos son:

PDT-100: Transmisor de presión diferencial.

FFRT-200: Transmisor registrador de relación de caudales.

FFS-50 : Interruptor de alarma de relación de caudales.

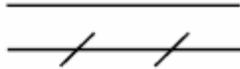
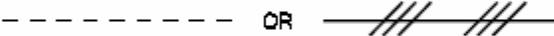
TE-25A, TE-25B: Dos sensores de temperatura pertenecientes al mismo lazo, cada uno identificado con sufijos diferentes.

HS-30:	Interruptor manual.
UR-10:	Registrador multivariable (ej.: Presión y Flujo).
TCV-20:	Válvula autocontroladora de temperatura.
PSV-40:	Válvula de seguridad contra presión.

4.2.- Normativa para representar las conexión a instrumentos.

Los instrumentos deben ir conectados al proceso, a la fuente de suministro de energía, y entre sí. La norma ISA S5.1, establece cuáles son los símbolos estándar para las líneas de conexión de los instrumentos. La tabla 4.2 muestra las líneas de conexión de acuerdo a lo indicado en el estándar anteriormente mencionado.

Tabla 4.2. Líneas de conexión de instrumentos.

Suministro de energía al instrumento, o conexión al proceso	
Señal no definida	
Señal neumática	
Señal eléctrica	
Señal hidráulica	
Tubo Capilar	
Señal electromagnética o sónica guiada	
Señal electromagnética o sónica no guiada	
Enlace interno vía software o red de datos	
Enlace mecánico	
SÍMBOLOS OPCIONALES PARA SEÑALES	
Señal neumática binaria	
Señal eléctrica binaria	

4.3.- Normativa para los símbolos de los instrumentos.

Los instrumentos tienen símbolos generales y específicos. La tabla 4.3 muestra los símbolos generales de los instrumentos. El símbolo del instrumento va de acuerdo a la ubicación y a la tecnología del mismo. Se aclara que la norma se refiere fundamentalmente a funciones de instrumentación, más que instrumentos en sí. Por ejemplo, un valor de una temperatura mostrada en una pantalla de un computador que forme parte del sistema de control de una planta industrial (consola de operación) es una función de instrumentación de indicación, y por lo tanto debe ser mostrada en un plano como indicador de temperatura. Es además una función compartida, ya que en la misma consola de operación aparecen también otros valores, además de la temperatura anteriormente mencionada.

Tabla 4.3. Símbolos generales de las funciones de instrumentación.

	Ubicación primaria, accesible al operador	Montado en campo	Ubicación auxiliar, accesible al operador
Instrumento discreto			
Función de instrumentación compartida			
Función de computo			
Función de lógica programable			

Las válvulas (cuerpo y actuador) disponen de símbolos específicos los cuales están indicados en la norma ISA S5.1. Las tablas 4.4 y 4.5 muestran los símbolos de los cuerpos y los actuadores respectivamente.

Tabla 4.4. Símbolos de cuerpos de válvulas.

1 Símbolo general	2 En ángulo	3 Mariposa	4 Rotativa
5 De tres vías	6 De cuatro vías	7 Globo	
9 De Diafragma	10 "DAMPER"	11 "DAMPER"	12 "DAMPER"

Tabla 4.4. Símbolos de actuadores de válvulas.

1 Sin posicionador	2 Con posicionador	3 Preferido	4 Opcional
Actuador neumático		Con posicionador, válvula de solenoide de presurización	
5 Diafragma balanceado	6 Motor eléctrico rotativo	7 Solenoide	
8 De acción simple	9 De acción doble	10 Preferida para cualquier cilindro	
Cilindro sin posicionador			



EJERCICIOS.

PROBLEMA 4.1.

Dibuje el símbolo y asigne el nombre correcto a los siguientes tipos de instrumentos:

- 1) Elemento primario de medición de presión perteneciente al lazo 100.
- 2) Indicador y controlador de flujo con salida eléctrica, perteneciente a un sistema de control distribuido (SCD).
- 3) Indicador de corriente eléctrica mostrado en panel.
- 4) Computador para cálculo de flujo acumulado (indicador y transmisor con salida digital), montado en panel.

PROBLEMA 4.2.

El siguiente símbolo aparece en un diagrama de instrumentación:

Éste representa un:



- a. Controlador de flujo.
- b. Punto de control fijo
- c. Convertidor de frecuencia.
- d. Elemento final de control.

PROBLEMA 4.3.

Realice el diagrama de instrumentación y tuberías del proceso de la Figura 4.2. Indique los nombres y símbolos de los instrumentos que aparecen en los recuadros. Coloque los símbolos adecuados de las líneas de señalización y control. Los instrumentos son:

- 1.- Válvula reguladora de flujo para control de temperatura.
- 2.- Convertidor I/P.
- 3.- Indicador y controlador de temperatura pertenecientes al SCD, y con salida de 4 a 20 mA,
- 4.- Transmisor de temperatura con salida de 4 a 20 mA.
- 5.- Interruptor eléctrico de alta temperatura.
- 6.- Alarma de alta temperatura perteneciente al SCD.
- 7.- Lógica indeterminada de control (Programable).

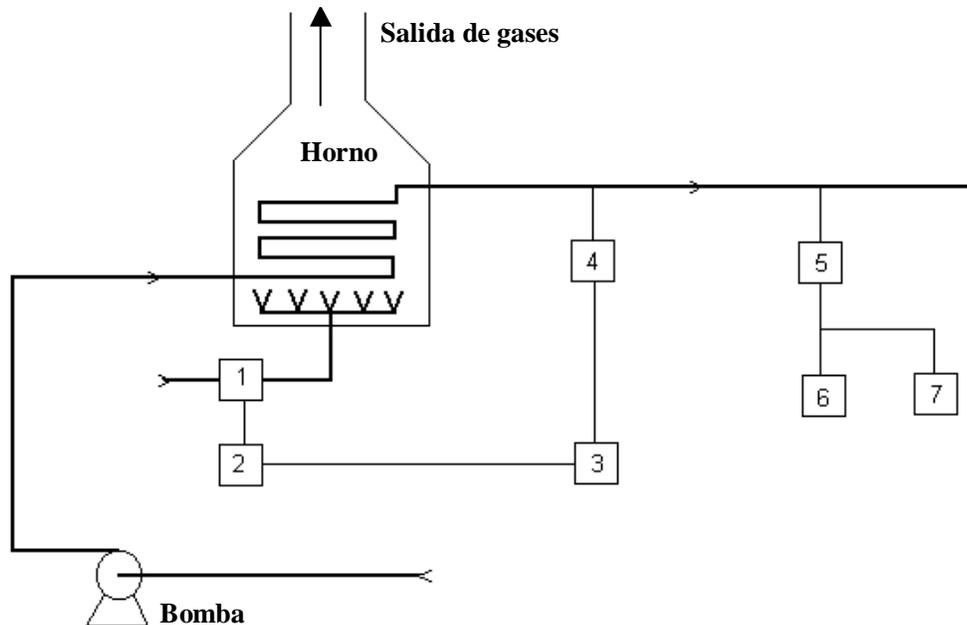


Figura 4.2. Diagrama de proceso.

PROBLEMA 4.4.

En la siguiente Figura se muestra una sección de un diagrama de instrumentación y tuberías. Con la información suministrada haga una tabla indicando: TAG, identificación funcional, tipos de señales de entrada y salida, y cualquier información adicional que Ud. considere pertinente.

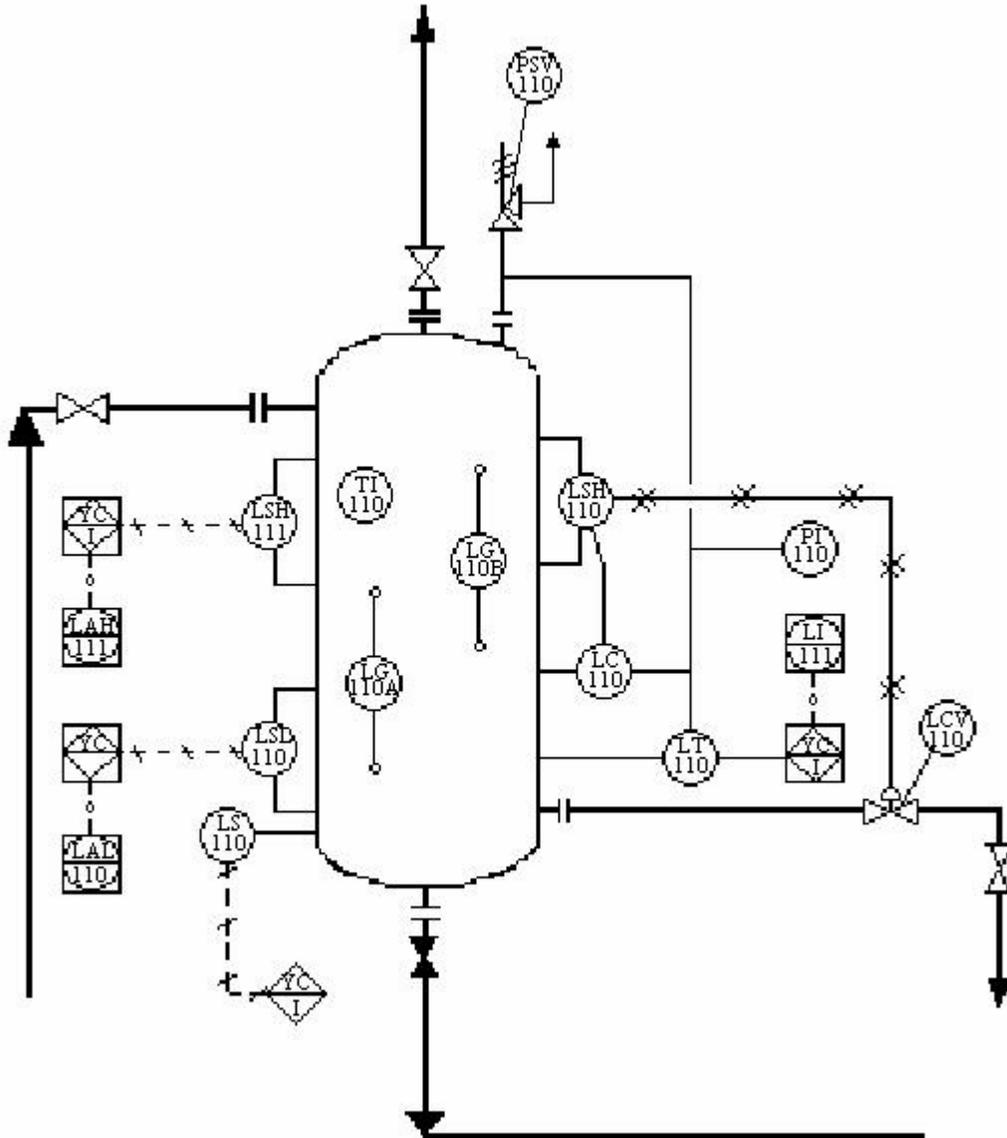


Figura 4.3. Diagrama de proceso.

CAPÍTULO V

5.- CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS DE LOS INSTRUMENTOS

Para la correcta selección de los instrumentos a ser instalados en un proceso, es necesario el conocimiento del significado de cada una de sus propiedades. En este capítulo, se hará una descripción de las características que forman parte de la especificación de un instrumento.

5.1. Características relacionadas con el rango.

Las características de los instrumentos relacionadas con el rango engloban las particularidades distintivas que poseen los mismos con respecto a la banda de valores de la variable medida. A continuación se presentan las características más importantes.

5.1.1.- Rango de medición (*range*).

Es el espectro de valores de la variable medida comprendido entre dos límites, dentro de los cuales, es recibida, transmitida, o indicada la señal. El rango de medición debe ir expresado en unidades de la variable medida, aún cuando en algunos casos también se puede especificar el rango de la variable recibida o transmitida. Por ejemplo un transmisor de temperatura puede tener un rango de medición de -10°C a 50°C en función de la variable medida, un rango en la entrada de -10mV a 100mV , y un rango en la salida de 4 a 20 mA.

Al límite alto del rango de medición se le denomina rango superior (RS), mientras que al límite bajo del rango de medición se le denomina rango inferior (RI).

Un instrumento no necesariamente puede ser calibrado en un rango de medición único, por ejemplo un multímetro digital puede tener los siguientes rangos de medición, seleccionados con un interruptor o perilla de selección: 0 V a 2 V, 0 V a 20 V, 0 V a 200 V y 0 V a 2000 V. En este caso se dice que el instrumento es multirango.

5.1.2.- Alcance (*span*).

El alcance del instrumento se define como el RS menos el RI.

$$\text{Alcance} = \text{RS} - \text{RI} \quad (5.1)$$

Típicamente en los instrumentos multirango también puede variar el alcance. El alcance del instrumento es un parámetro muy importante, ya que gran parte de las características del mismo están expresadas en función del alcance o del RS.

5.1.3.- Rango con cero elevado.

Cuando el cero de la variable medida está por encima del RI, se dice que el instrumento tiene el rango con el cero elevado o que tiene elevación de cero. El factor de elevación de cero (FE) se calcula como:

$$FE = |RI| / Alcance \quad (5.2)$$

5.1.4.- Rango con cero suprimido.

Cuando el cero de la variable medida está por debajo del RI, se dice que el instrumento tiene el rango el cero suprimido o que tiene supresión de cero. El factor de supresión de cero (FS) se calcula como:

$$FS = |RI| / Alcance \quad (5.3)$$

☺ EJEMPLO 5.1.

La siguiente Tabla muestra un ejemplo del uso de la terminología asociada al rango y al alcance.

Tabla 5.1. Características relacionadas con el rango,

RANGOS TIPICOS	NOMBRE	RANGO	RI	RS	SPAN	DATOS ADICIONALES
----- 0 100	----	0 a 100	0	100	100	----
----- ----- -25 0 100	Cero elevado	-25 a 100	-25	100	125	Factor de elevación = 0,2
----- 20 100	Cero suprimido	20 a 100	20	100	80	Factor de supresión = 0,25
----- -100 0	Cero elevado	-100 a 0	-100	0	100	Factor de elevación = 1
----- -100 -20	Cero elevado	-100 a -20	-100	-20	80	Factor de elevación = 1,25

5.1.5.- Variabilidad del rango (*rangeability*).

La variabilidad del rango de un instrumento, se define como la relación entre el valor máximo que puede medir y el valor mínimo que puede medir. Por ejemplo, un indicador de flujo que tenga una variabilidad del rango de 3:1, indica que el máximo caudal que puede medir es tres veces mayor que el mínimo.

Normalmente la variabilidad del rango es una característica principalmente asociada a los instrumentos de medición de caudal y a las válvulas para control de caudal.

5.2.- Características estáticas de los instrumentos.

Las características estáticas de un instrumento son aquellas que exhibe el instrumento en estado estacionario, es decir, cuando la variable medida se ha estabilizado en un valor y permanece invariante en el tiempo.

5.2.1.- Determinación de las características estáticas de un instrumento.

Al final de la etapa de fabricación de un instrumento y durante la etapa de funcionamiento del mismo, se hace necesario la determinación, en el primer caso, y la comprobación, en el segundo, de las características estáticas de un instrumento.

Una vez que un instrumento ha sido instalado, se debe realizar una revisión periódica de su calibración que consiste en determinar si el comportamiento del mismo está acorde con los parámetros de especificación dados por el fabricante y proceder a su corrección en caso de ser necesario. A continuación se describe el procedimiento general que debe ser aplicado para la determinación y comprobación de las características estáticas de un instrumento.

Primeramente se deberá disponer de un instrumento patrón, con el cual comparar las mediciones obtenidas. La tolerancia del instrumento patrón con respecto al parámetro que va a ser estimado, debe ser preferiblemente una décima parte de la tolerancia permitida en el instrumento bajo prueba, en todo caso no debe ser superior a un tercio de la tolerancia permitida. Por ejemplo, si se desea estimar la banda muerta de un instrumento, del cual se espera que no sea superior a 0,2% del alcance, se debe utilizar preferiblemente un instrumento patrón que tenga una banda muerta inferior a 0,02% del alcance, y en todo caso nunca superior a 0,06% del alcance.

En algunos casos no es necesario recurrir a la utilización de un instrumento patrón, y en su lugar se recurre a la medición de la variable, de la cual se conoce su valor, aplicando leyes físicas. Este tipo de calibración es generalmente utilizado para instrumentos de gran exactitud, como lo son los instrumentos patrón, e instrumentos de laboratorio.

Las mediciones a tomar para la determinación de cierta característica, deben estar distribuidas a lo largo de todo el rango de medición, cubriendo por lo menos desde un valor por encima del 10% del RI y por debajo del 10% del RS. Se deben tomar mediciones al menos en 5 puntos diferentes de la escala.

El proceso de calibración, consiste en tomar varias mediciones a lo largo de toda la escala, recorriéndola en sentido ascendente y descendente varias veces, y esperando que la medida se estabilice en su valor final en cada medición. Se debe registrar el valor medido (V_m), el valor registrado por el instrumento patrón y la diferencia entre ambos valores, considerando su signo (típicamente se resta el valor medido menos el valor ideal o patrón). La diferencia entre ambos valores se puede expresar en función del span, realizando la siguiente operación para cada medición:

$$\text{Error} = \varepsilon = \frac{(V_m - V_r)}{\text{Span}} \quad (5.4)$$

donde:

V_r = Valor real

El error también se puede expresar en términos porcentuales multiplicándolo por 100, o dejarlo en términos absolutos en unidades de la variable medida.

5.2.2.- Exactitud (*accuracy*).

Es una medida de conformidad de un valor indicado, transmitido o registrado, a un valor ideal o estándar. La inexactitud de un instrumento es una fuente de error en la medición, aunque generalmente no es la única. Muchos fabricantes de instrumentos incluyen en el valor de exactitud, los errores por histéresis, banda muerta, repetibilidad y linealidad de un instrumento.

5.2.2.1.- Formas de estimar la exactitud.

Existen varias formas de estimar la exactitud de un instrumento, las cuales se explican a continuación.

a) Basada en el valor más alejado.

En este caso se toma el error mayor obtenido durante el proceso de calibración del instrumento, ya sea que este halla sido recorriendo la escala en sentido ascendente o descendente. Dicho error corresponde al valor más alejado del valor real o ideal.

$$\text{Exactitud} = \pm |V_{m \text{ más alejado}} - V_r| \quad (5.5)$$

b) Basada en la desviación promedio.

En este caso se calcula la desviación promedio de todas las mediciones tomadas para una misma entrada, y se expresa como la exactitud.

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (5.6)$$

donde:

$$d_i = |V_{\text{medido}} - V_r| \quad (5.7)$$

n = Número de mediciones

Por lo tanto, la exactitud será:

$$\text{Exactitud} = \pm \bar{d} \quad (5.8)$$

Un instrumento tiene diferentes exactitudes en diferentes puntos del rango de medición. Para calcular la exactitud total (en todo el rango de medición) se toma entonces la desviación promedio mayor encontrada.

c) Basada en la desviación estándar.

En este caso se calcula la desviación estándar del error de todas las mediciones tomadas, para lo cual se asume que el error sigue una curva de distribución normal. La fórmula utilizada para calcular la desviación estándar es la siguiente:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum X_i^2}{n-1}} \quad (5.9)$$

donde:

$$X_i = (e_i - e_{\text{prom}}) \quad (5.10)$$

e_i = Error en la medición i-ésima
 e_{prom} = Error promedio de las mediciones

Los términos e_i pueden estar expresados en unidades de la variable medida o relativos al alcance. La exactitud se calcula entonces de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{Exactitud} = \pm (\bar{e} + k.\sigma) \quad (5.11)$$

donde k es un valor entre 1 y 3, siendo $k=1$ cuando se está tomando como referencia el 68 % de la muestra, para $k=2$ se está tomando el 95% y para $k = 3$ el 99,7%.

Si para los cálculos se toman todos los valores, tanto recorriendo la escala en forma ascendente como descendente, entonces los valores de exactitud calculados, contemplan los errores de precisión e histéresis.

5.2.2.2.- Formas de expresar la exactitud.

Existen varias formas de expresar la exactitud, entre las más comunes encontramos:

a) Porcentual con respecto al alcance.

En este caso la exactitud representa el límite del error absoluto que se puede cometer en la medición, en cualquier punto del rango de medición del instrumento, expresado en términos porcentuales con respecto al span.

😊 EJEMPLO 5.2.

Considere un instrumento que tiene las siguientes características:

RM: 200 °C a 400 °C
 Exactitud: $\pm 0,5\%$ del Span.
 Vm: 300 °C

Calcular entre qué valores puede estar comprendido el valor real.

✍ Solución.

Span = RS - RI = 400 °C - 200 °C = 200 °C.

Exactitud = $\pm 0,5\%$ de 200 °C = $\pm 1^\circ\text{C}$

El valor real debe estar comprendido entonces entre (300 -1) y (300 +1) °C, es decir,

$$299\text{ }^{\circ}\text{C} < V_r < 301\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

b) Porcentual con respecto al rango superior.

En este caso la exactitud representa el límite del error absoluto que se puede cometer en la medición, en cualquier punto del rango de medición del instrumento, expresado en términos porcentuales con respecto al RS de medición.

☺ **EJEMPLO 5.3.**

Considere un instrumento que tiene las siguientes características:

RM: 200 °C a 400 °C
Exactitud: $\pm 0,5\%$ del RS.
Vm: 300 °C

Calcular entre que valores puede estar comprendido el valor real.

 **Solución.**

$$\text{Exactitud} = \pm 0,5\% \text{ de } 400\text{ }^{\circ}\text{C} = \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$$

El valor real debe estar comprendido entonces entre (300 -2) y (300 +2) °C, es decir,

$$298\text{ }^{\circ}\text{C} < V_r < 302\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

c) Porcentual con respecto al valor medido.

En este caso la exactitud representa el límite del error absoluto que se puede cometer en la medición, en cualquier punto del rango de medición del instrumento, expresado en términos porcentuales con respecto al valor medido. Debe notarse, que en este caso el error absoluto no es constante a lo largo de todo el rango de medición, sino más bien depende del valor del medido.

☺ **EJEMPLO 5.4.**

Considere un instrumento que tiene las siguientes características:
Exactitud: $\pm 0,5\%$ del Vm.
Vm: 300 °C

Calcular entre que valores puede estar comprendido el valor real.

 **Solución.**

Exactitud = $\pm 0,5\%$ de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ = $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$

El valor real debe estar comprendido entonces entre $(300 - 1,5)$ y $(300 + 1,5)$ $^{\circ}\text{C}$, es decir,

$$298,5\text{ }^{\circ}\text{C} < V_r < 301,5\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

d) En unidades de la variable medida.

En este caso la exactitud representa el máximo error absoluto que puede ser cometido en la medición, para cualquiera que sea el valor medido, y expresado en unidades de la variable medida.

 **EJEMPLO 5.5.**

Considere un instrumento que tiene las siguientes características:

Exactitud: $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$

V_m : $300\text{ }^{\circ}\text{C}$

Calcular entre que valores puede estar comprendido el valor real.

 **Solución.**

El valor real debe estar comprendido entonces entre $(300 - 3)$ y $(300 + 3)$ $^{\circ}\text{C}$, es decir,

$$297\text{ }^{\circ}\text{C} < V_r < 303\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

5.2.3.- Precisión o repetibilidad (*repeatability*).

La precisión de un instrumento, es la capacidad para indicar valores idénticos, bajo el mismo valor de la variable medida y en las mismas condiciones de servicio (mismo sentido de variación). A diferencia de la exactitud, la precisión indica la dispersión entre sí, de los valores medidos, más no la diferencia entre los valores medidos y los valores reales.

5.2.3.1.- Formas de estimar la precisión.

La precisión se suele estimar por los siguientes métodos:

a) Basada en los valores más alejados entre sí.

En este caso se toma la máxima diferencia obtenida entre dos lecturas para la misma entrada y en el mismo sentido de variación.

b) Basada en la desviación estándar.

En este caso se calcula la desviación estándar de las lecturas con respecto a la lectura promedio, recorriendo la escala en sentido ascendente y en sentido descendente. De los dos valores de desviación estándar obtenidos, se toma el peor (el mayor).

La fórmula para calcular la precisión, basada en la desviación estándar es:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum X_i^2}{n-1}} \quad (5.12)$$

donde:

$$X_i = (V_m - V_m(\text{promedio})) \quad (5.13)$$

Se deben tomar los valores promedio de las mediciones en los puntos de la escala fijados para realizar la determinación de las características estáticas.

5.2.4.- Diferencia entre exactitud y precisión.

En la Figura 5.1 se puede observar la diferencia entre exactitud y precisión. Se puede concluir que un instrumento puede ser: exacto y preciso, exacto mas no preciso, preciso pero no exacto y ni preciso ni exacto.

Es importante indicar que en la especificación de exactitud de un instrumento está contemplada la repetibilidad del mismo, sin embargo en ciertas circunstancias es necesario conocer el valor de la repetibilidad así como el de exactitud.

En las aplicaciones de control continuo automático a lazo cerrado, la repetibilidad de un instrumento es un factor importante en la estabilidad del lazo, ya que un transmisor que reporte valores diferentes para el mismo valor de entrada, puede ocasionar oscilaciones indeseadas a la salida del controlador que pueden degenerar en inestabilidad.

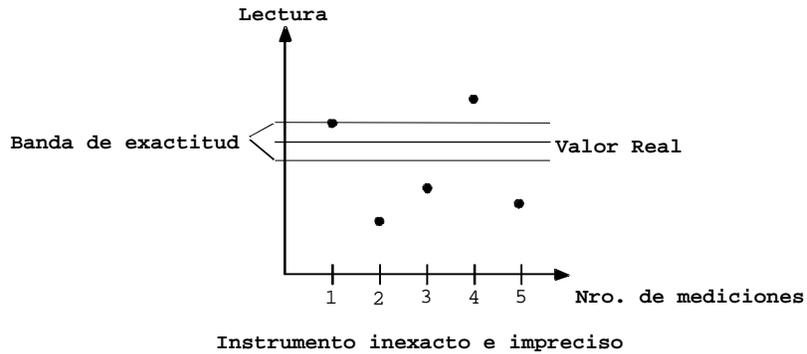
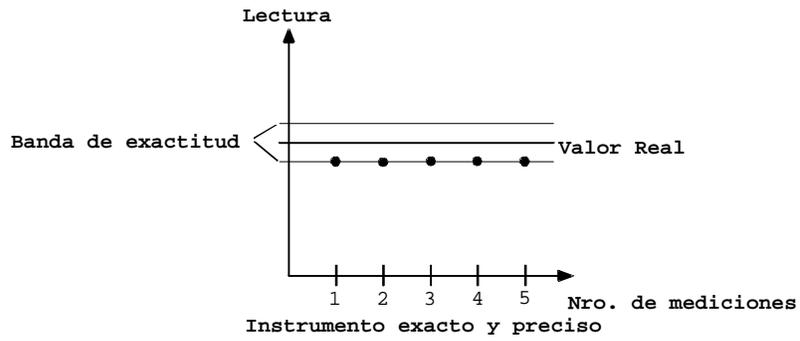
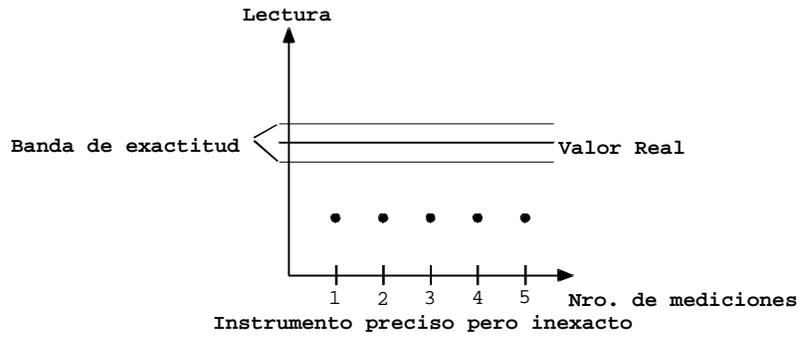
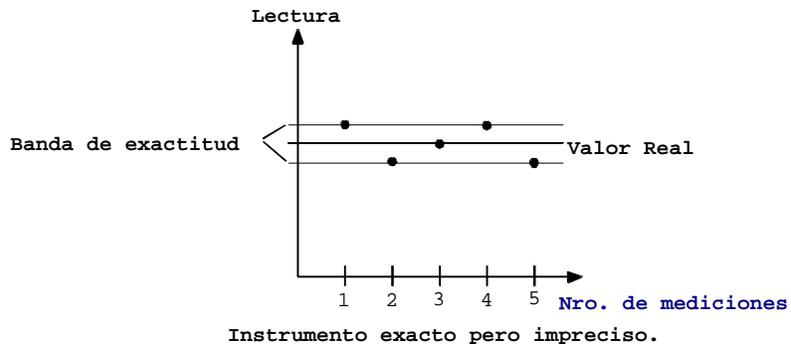


Figura 5.1. Diferencia entre exactitud y precisión.

5.2.5.- Banda muerta (*dead band*).

Es el rango de valores dentro del cual puede variar la variable medida (señal de entrada), tal que no se producen variaciones a la salida del instrumento.

La banda muerta se mide al momento de ocurrir un cambio de dirección en el sentido de variación de la variable medida. En la Figura 5.2 (a) puede observarse la respuesta de un instrumento que presenta banda muerta.

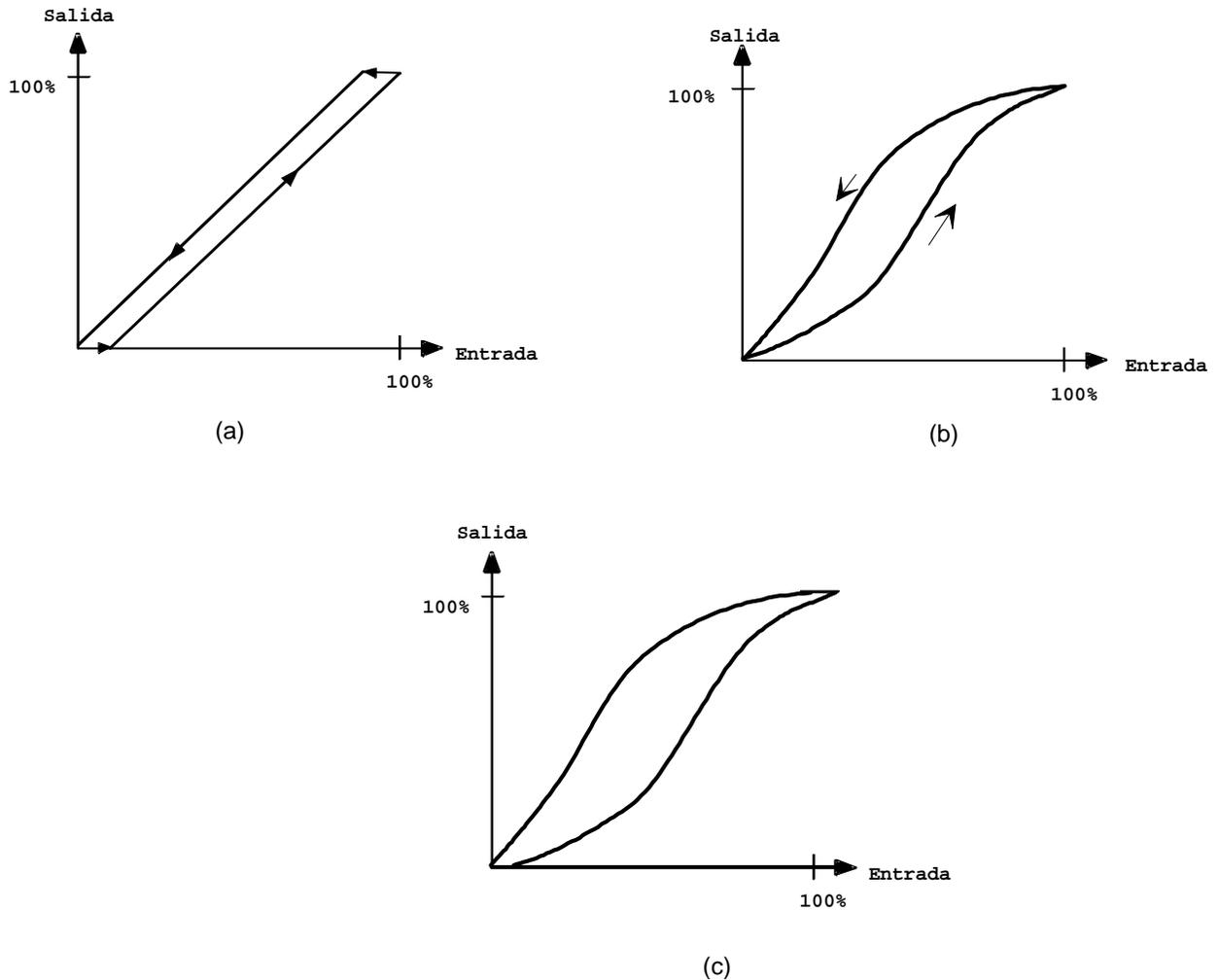


Figura 5.2. (a) Banda muerta. (b) Histéresis. (c) Histéresis y banda muerta.

La banda muerta en instrumentos mecánicos es ocasionada principalmente debido a la fricción existente entre las piezas mecánicas. Se mide en cada ciclo de medición (recorrido ascendente y descendente), durante el proceso de calibración de un instrumento y se toma la peor de ellas.

Para medir la banda muerta se puede ejecutar el siguiente procedimiento:

1. Variar lentamente la entrada del instrumento (ya sea incrementándola o disminuyéndola) hasta que se comience a observar un cambio en la salida.
2. Registrar el valor de entrada al cual se comenzó a observar la variación a la salida.
3. Variar lentamente la entrada en la dirección opuesta, hasta que se observe un cambio en la salida.
4. Registrar el valor de la entrada al cual se comenzó a observar variación a la salida.
5. La diferencia entre los valores de entrada obtenidos en el segundo y el cuarto paso es el valor de la banda muerta.

5.2.6.- Histéresis.

Es la diferencia máxima entre los valores indicados por un instrumento, para un mismo valor cuando se recorre la escala en ambos sentidos y para ciclos consecutivos. En la Figura 5.2 (b) puede observarse la respuesta de un instrumento que presenta histéresis.

Típicamente la respuesta de un instrumento presenta una combinación de histéresis más banda muerta (ver Fig. 5.2 (c)), por lo que para obtener el valor de histéresis, se debe primero conocer su banda muerta, luego al valor de histéresis más banda muerta obtenido de la curva de calibración, se le resta el valor de la banda muerta, para obtener así la histéresis.

5.2.7.- Resolución.

Es el mínimo intervalo entre dos valores adyacentes que pueden ser distinguidos el uno del otro. Por ejemplo, una regla milimetrada tiene una resolución de un milímetro.

EJEMPLO 5.6.

Un multímetro digital de tres dígitos y medio, está ajustado para trabajar en el rango de 0 a 200 V. Calcule la resolución.

Solución.

Como el multímetro es de tres dígitos y medio, el máximo valor que puede medirse en dicho rango de medición es 199,9 V. Luego el próximo valor más cercano es 199,8 V, por lo que la resolución del instrumento es:

$$(199,9 \text{ V} - 199,8 \text{ V}) = 0,1 \text{ V}.$$

5.2.8.- Linealidad.

Es la proximidad con que la curva de respuesta de un instrumento (salida en función de la entrada), se asemeja a una línea recta. Usualmente se mide la no linealidad, y se expresa como linealidad. Para determinarla, se mide la máxima desviación de la curva promedio de calibración con respecto a una línea recta, la cual es trazada de acuerdo a tres métodos diferentes, los cuales se explican a continuación. Generalmente, el valor de linealidad obtenido por cualquiera de los métodos se expresa en función del span.

a) Linealidad independiente.

En este caso la línea recta utilizada para determinar la linealidad es trazada de forma tal de minimizar la distancia promedio con respecto a la curva de calibración.

b) Linealidad terminal.

La línea recta en este caso se traza entre los dos puntos extremos de la curva de calibración. La linealidad se calcula entonces como la máxima desviación de la curva de calibración con dicha línea recta.

c) Linealidad basada en cero.

En este caso la línea recta es trazada de modo que coincida con la curva de calibración en el punto inferior de la escala, pero con la inclinación adecuada para minimizar la máxima desviación entre la curva de calibración y dicha línea recta.

5.2.9.- Deriva (*drift*).

Es la máxima variación experimentada a la salida de un instrumento, durante un período de tiempo determinado, cuando la entrada se mantiene a un valor constante durante dicho período. La deriva generalmente se expresa en función del span.

Por ejemplo, si un indicador de temperatura que tiene una deriva de 0,5% del span en un período de 6 meses, y el span es de 200 °C, entonces la variación máxima esperada a la salida, bajo condiciones estables de la entrada es de $\pm 1^\circ\text{C}$.

La deriva típicamente se manifiesta como un corrimiento constante de la salida en todo el rango de medición (error de cero), por lo que este error puede ser corregido con recalibración del instrumento. A la deriva también se le suele llamar estabilidad, aunque este es un término más amplio que no necesariamente se refiere siempre a la salida del instrumento.

5.2.10.- Estabilidad.

La estabilidad se refiere a la máxima variación experimentada por alguna de las características del instrumento con respecto a una variable externa al instrumento, la cual en términos generales no puede ser controlada. Por ejemplo, un transmisor de presión que tenga la siguiente especificación: Exactitud = 0,05% del Span/ °C. En este caso se está haciendo referencia a la estabilidad con respecto a variaciones de la

temperatura ambiente, de la especificación de exactitud del instrumento.

5.2.11.- Sensibilidad.

Es la relación que hay entre la variación experimentada por la salida de un instrumento, y la variación a la entrada causante del cambio.

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\Delta\text{Salida}}{\Delta\text{Entrada}} \quad (5.14)$$

Por ejemplo, un termopar (sensor de temperatura), que genere una variación a la salida de 100 mV para un cambio de temperatura de 100°C, tendrá una sensibilidad de 1mV/°C. La sensibilidad también se puede expresar en función del span del instrumento, en este caso, se calcula como:

$$\text{Sensibilidad} = \left(\frac{\Delta\text{Salida}}{\Delta\text{Entrada}} \right) / \text{Span} \quad (5.15)$$

☺ EJEMPLO 5.7.

La siguiente Tabla muestra el resultado de la calibración de un instrumento. En la misma aparecen los errores absolutos expresados en función del alcance obtenidos para 11 puntos de la escala, para tres ciclos de recorrido en forma ascendente y descendente comenzando desde media escala. También se presenta el error promedio ascendente y descendente, así como el error promedio total.

En base a los resultados de la calibración, estimar la exactitud, histéresis y repetibilidad del instrumento.

Tabla 5.2. Calibración de un instrumento.

Entrada	ERROR										Error promedio
	Subiendo	Bajando	Subiendo	Bajando	Subiendo	Bajando	Subiendo	Subiendo Promedio	Bajando Promedio	Subiendo Promedio	
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0		-0,04		-0,05		-0,06			-0,05		-0,05
10		+0,14	+0,04	+0,15	+0,05	+0,16	+0,06		+0,15	+0,05	+0,10
20		+0,23	0,08 ⁽³⁾	0,26 ⁽¹⁾	+0,09	0,26 ⁽¹⁾	0,13 ⁽³⁾		+0,25	+0,10	+0,175
30		+0,24	+0,09	+0,25	+0,10	+0,26	+0,11		+0,25	+0,10	+0,175
40		+0,13	-0,07 ⁽²⁾	0,15 ⁽²⁾	-0,04	+0,17	-0,04		+0,15	-0,05	+0,05
50	-0,18	-0,02	-0,16	+0,01	-0,13	+0,01	-0,13	-0,15	0	-0,15	-0,075
60	-0,27	-0,12	-0,25	-0,10	-0,23	-0,08		-0,25	-0,10		-0,175
70	-0,32 ⁽¹⁾	-0,17	-0,30	-0,16	-0,28	-0,12		-0,30	-0,15		-0,225
80	-0,27	-0,17	-0,26	-0,15	-0,22	-0,13		-0,25	-0,15		-0,2
90	-0,16	-0,06	-0,15	-0,05	-0,14	-0,04		-0,15	-0,05		-0,1
100	+0,09		+0,11		+0,10			+0,10			+0,1

 **Solución.**

a) Cálculo de la exactitud.

Para la estimación de la exactitud basada en el valor más alejado, simplemente se recorre la tabla y se buscan los errores más grandes, tanto positivos como negativos. En este caso dichos valores son los identificados con (1), es decir:

$$\text{Exactitud} = -0,32\% \text{ y } -0,26\% \text{ del span.}$$

En este caso se puede tomar el valor más alejado, es decir, 0,32% e indicar que la exactitud medida del instrumento basada en el valor más alejado es de $\pm 0,32\%$ del Span.

b) Cálculo de la histéresis y banda muerta.

La máxima separación entre los valores medidos, para ciclos consecutivos, se obtiene en los puntos marcados con (2), por lo que:

$$\text{Histéresis} + \text{Banda Muerta} = 0,15\% - (-0,07\%) = 0,22\% \text{ del Span.}$$

Si de las mediciones anteriores conocemos que la banda muerta es 0,1% del Span, entonces la histéresis es 0,12% del Span.

c) Cálculo de la precisión o repetibilidad.

La repetibilidad se debe calcular buscando en la tabla los valores más alejados entre si para los ciclos de subida o los de bajada y para un mismo valor de la entrada. En este caso estos valores se obtienen en los puntos marcados con (3) en la tabla, la repetibilidad es entonces la separación entre dichos valores, es decir,

$$\text{Repetibilidad} = 0,13\% - 0,08\% = 0,05\% \text{ del Span.}$$

d) Linealidad.

Para el cálculo de la linealidad, se debe graficar el error promedio (última columna de la derecha), y trazar líneas rectas de acuerdo a lo indicado en subcapítulo 5.2.8, y medir la máxima desviación existente entre dichas rectas y la curva promedio.

5.3.- Características dinámicas.

Las características dinámicas de un instrumento se refieren al comportamiento del mismo cuando la entrada o variable medida, está cambiando en el tiempo.

Para la determinación de las características dinámicas de un instrumento, típicamente se somete al mismo

a una entrada tipo escalón, y se estudia el comportamiento de la salida en el tiempo. La respuesta típica de un instrumento, ante un escalón, es ilustrada en la Figura 5.3.

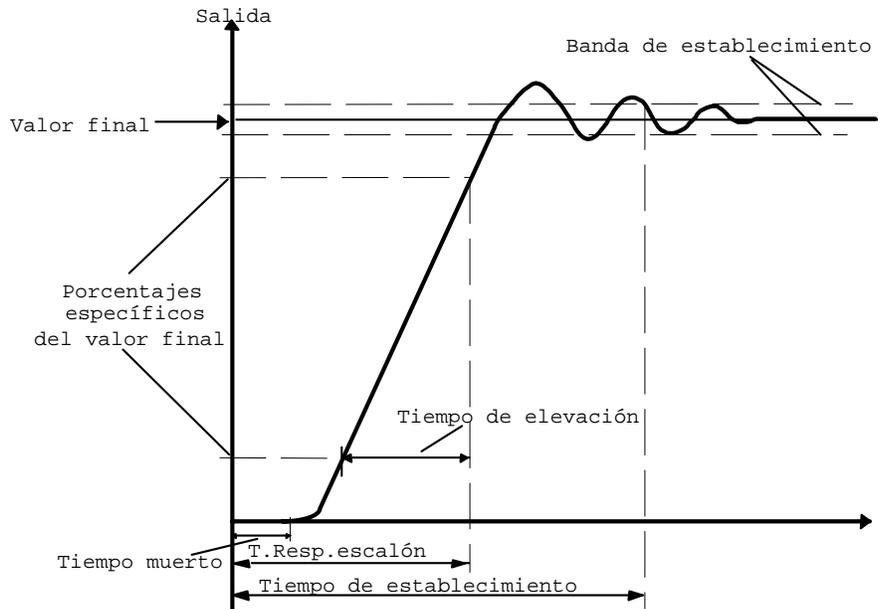


Figura 5.3. Respuesta al escalón de un instrumento.

5.3.1.- Tiempo muerto.

Es el tiempo transcurrido desde el inicio de un estímulo a la entrada del instrumento, hasta que existe un cambio observable a la salida. Una parte del tiempo muerto se debe a la presencia de una banda muerta en el instrumento.

5.3.2.- Tiempo de respuesta al escalón.

Es el tiempo transcurrido desde un cambio en la entrada (tipo escalón), hasta que la salida alcance un porcentaje específico del valor en estado estacionario. Usualmente este porcentaje suele estar entre 90% y 99%. En algunos casos también se suele medir el tiempo necesario para que la salida entre en la banda de exactitud del instrumento.

5.3.3.- Tiempo de establecimiento.

Es el tiempo transcurrido después del inicio de un estímulo a la entrada (escalón), hasta que la salida se estabiliza dentro de una banda alrededor del valor final (usualmente 2%, o también se puede utilizar la banda de exactitud).

Por ejemplo, si el tiempo de establecimiento al 95% de cierto instrumento es de 5 s, esto significa que el

instrumento ante un cambio tipo escalón en la entrada tarda 5 s en establecerse dentro de una banda de $\pm 5\%$ del valor final.

A diferencia del tiempo de respuesta, el tiempo de establecimiento se mide cuando la salida entra en la banda predefinida y nunca sale de ella, mientras que para la determinación del tiempo de respuesta sólo se toma en cuenta cuando la salida entra por primera vez en la banda preestablecida.

5.3.4.- Tiempo de elevación.

Es el tiempo que tarda la salida en recorrer, ante un cambio tipo escalón en la entrada, dos límites preestablecidos del valor final o de estado estacionario. Por ejemplo, el tiempo de elevación 10-90 es el tiempo que tarda la salida en viajar desde un valor al 10% del valor final hasta el 90% del valor final.

5.3.5.- Velocidad de respuesta.

Es la rapidez a la que el instrumento responde a cambios en la cantidad medida. Usualmente se determina sometiendo a la entrada a un cambio tipo escalón, y midiendo el cambio a la salida experimentada durante el tiempo de elevación, es decir:

$$\text{Velocidad de respuesta} = \frac{\Delta \text{Salida}}{\Delta t_{\text{elevacion}}} \quad (5.16)$$

Por ejemplo, si la velocidad de respuesta de un sensor de temperatura es de 10°C/s , esto significa que el instrumento está en capacidad de medir dichas variaciones de temperatura, sin error dinámico, es decir, con un error sólo debido a la inexactitud del instrumento.

5.3.6.- Constante de tiempo.

Es el tiempo que tarda la salida en recorrer el 63% del valor final, ante un cambio tipo escalón en la entrada. El hecho de que se indique la constante de tiempo de un instrumento, no indica que el mismo responda como un sistema de primer orden.



EJERCICIOS.

PROBLEMA 5.1.

Para determinar las características estáticas de un instrumento se realizaron varias mediciones recorriendo la escala en forma ascendente y descendente, comenzando desde media escala hasta llegar al RS; luego descendiendo desde el RS hasta el RI; y de nuevo recorriendo la escala en modo ascendente hasta llegar a media escala. En total se recorrió la escala en modo ascendente y descendente tres veces respectivamente.

En cada medición se registró la diferencia entre la salida observada (lectura) y la salida ideal. La diferencia obtenida o error absoluto, se expresó en porcentaje del alcance ideal del instrumento, obteniéndose los resultados indicados en la Tabla anexa.

En base a los resultados, determine:

- a) Exactitud basada en el valor más alejado y expresada en función del alcance.
- b) Precisión basada en los valores más alejados entre sí y expresada en función del alcance.
- c) Histéresis expresada en función del alcance, si se sabe que la banda muerta es de 0,1% del alcance.
- d) Si el instrumento en cuestión es un indicador de temperatura cuyo rango de medición es de -10°C hasta 100°C , determine en base a la exactitud obtenida en el punto a), entre qué valores estaría comprendido el valor real, cuando el valor medido es de 10°C .
- e) Para el instrumento anterior, indicar cuál sería la exactitud expresada en función del RS.

Tabla 5.3. Calibración de un instrumento.

Entrada %	Error porcentual, %						
	Subiendo %	Bajando %	Subiendo %	Bajando %	Subiendo %	Bajando %	Subiendo %
0		-0,04		-0,05		-0,06	
10		+0,14	+0,04	+0,15	+0,05	+0,16	+0,06
20		+0,23	+0,08	+0,26	+0,09	+0,26	+0,13
30		+0,24	+0,09	+0,25	+0,10	+0,26	+0,11
40		+0,13	-0,07	+0,15	-0,04	+0,17	-0,04
50	-0,18	-0,02	-0,16	+0,01	-0,13	+0,01	-0,13
60	-0,27	-0,12	-0,25	-0,10	-0,23	-0,08	
70	-0,32	-0,17	-0,30	-0,16	-0,28	-0,12	
80	-0,27	-0,25	-0,33	-0,15	-0,22	-0,13	
90	-0,16	-0,06	-0,15	-0,05	-0,14	-0,04	
100	+0,09		+0,11		+0,10		

PROBLEMA 5.2.

Un transmisor de temperatura tiene un rango de medición de 0 °C a 100 °C, y una exactitud de $\pm 1\%$ del RS. Grafique el valor del error absoluto máximo y el error máximo relativo al valor medido, en todo el rango de medición.

PROBLEMA 5.2.

Si el transmisor de la pregunta anterior tiene ahora una exactitud de 1% del valor medido, grafique el valor del error absoluto máximo y el error máximo relativo al valor medido, en todo el rango de medición.

PROBLEMA 5.3.

En la calibración de un instrumento de nivel de un tanque se llenó y vació éste 4 veces. Hallar el valor de la histéresis si se sabe que RS= 4 m, banda muerta = 0,2% Span y el mayor error entre vaciado y llenado es:

Tabla 5.4. Calibración de un instrumento.

Muestra	Error
40% del nivel	1,2% Vm
50% " "	1,5% Span
60% " "	1,42% Vm
20% " "	0,97% RS

PROBLEMA 5.4.

Un instrumento mide 150°C y su RI es de 25°C y el RS es de 200°C. Entre qué valores está el Vr si su exactitud es de:

- a) 0,5% Vm b) 1% Span c) 0,8% RS

PROBLEMA 5.5.

Un sensor de nivel que se encuentra en un silo de granos tiene un error de 1% RS, el del transmisor que envía la señal al cuarto de control es de 0,05% Vm y el indicador tiene un error del 3% del Span. Hallar el nivel del silo sabiendo que el error probable es 0,3162 m. El rango de medición es de 0-10 m.

CAPÍTULO VI

6.- ANÁLISIS DE ERROR

En general, toda medición está acompañada de un error inherente, el cual se debe estimar para establecer que tan confiable es la medición realizada.

Una buena estimación del error en una medición no se puede realizar si no se conoce cuáles son las fuentes que lo ocasionan, y cual es el impacto que tiene cada una de ellas en dicha medición. Por otra parte, del conocimiento de las fuentes de error se pueden trazar estrategias de modo de minimizarlo o compensarlo.

6.1.- Fuentes de error.

Existen diferentes fuentes que generan error, algunas de las cuales se mencionan a continuación:

- **El ruido:** Es una señal no deseable que no transmite ninguna información útil. La característica fundamental del ruido, es que el mismo es aleatorio. El ruido puede ser interno al instrumento, o proceder del exterior, puede ser mecánico (ej.: vibración), o eléctrico (ej.: interferencia electromagnética). Puede originarse en el elemento primario de medición, en el medio de conexión o en el instrumento receptor. Usualmente el ruido se puede minimizar a nivel de diseño del instrumento y mediante el empleo de técnicas adecuadas durante la instalación del instrumento.
- **La calibración defectuosa del sistema de medición.** Usualmente debida al tiempo de uso del instrumento, y solo aparece en los instrumentos no-inteligentes.
- **Las características estáticas y dinámicas del instrumento,** por ejemplo, la inexactitud, la velocidad de respuesta, resolución, etc.
- **El cambio de energía por interacción.** Ésto es cierto, siempre y cuando la energía para la medición se obtenga de la variable medida. Por ejemplo, en un indicador de nivel de tubo de vidrio no existe este tipo de error, pero en un sensor invasivo si. Se puede minimizar seleccionando adecuadamente el sensor.
- **Transmisión de la señal.** En este proceso se pueden presentar tres tipos de errores: atenuación, distorsión y pérdidas, este último es de mayor importancia en sistema neumáticos donde puede existir una pérdida de aire a través de los tubos que conducen la señal neumática.
- **Deterioro del sistema.** Cada instrumento tiene un tiempo de vida útil dentro del cual la operación del mismo es confiable. El desgaste, principalmente en piezas mecánicas, ocasiona cambios en el comportamiento del instrumento y puede minimizarse calibrando periódicamente al instrumento.
- **Influencia del medio ambiente.** Los cambios en las condiciones ambientales a las cuales está sometido un instrumento, puede ocasionar cambios en el comportamiento del instrumento. Los instrumentos inteligentes diseñados en la actualidad, miden las condiciones ambientales y compensan el error.
- **Errores de observación o interpretación.** Estos errores son básicamente errores humanos, y suelen ser de

paralaje, de interpolación y bruto. Estos errores pueden ser minimizados tomando varias mediciones y recurriendo a la estadística.

- **Cambios en los parámetros de cálculo.** En los instrumentos que realizan operaciones de cálculo con la variable medida, se puede presentar el caso de que valores asumidos como constantes no lo son en la vida real.

6.2.- Tipos de error en un instrumento.

Existen tres tipos de error los cuales usualmente se pueden presentar en un instrumento: error de cero, error de multiplicación (o span) y error de angularidad (o linealidad).

Error de cero.

Es un corrimiento constante entre el valor medido y el valor real o ideal de la variable y es normalmente medido tomando como referencia el cero de la variable medida. Es decir, se coloca en cero la variable medida y se observa la salida del instrumento; si su valor no está comprendido dentro de la banda de exactitud del instrumento, se dice que el instrumento tiene un error de cero. Este error permanece constante durante todo el rango de medición (ver Fig. 6.1 (a)), y puede ser corregido mediante la calibración del instrumento (ajustando el tornillo de cero).

Error de multiplicación (o span).

Es la diferencia entre el alcance actual del instrumento y el alcance ideal. Cuando este error está presente el alcance puede ser ligeramente mayor o menor al alcance ideal. Se llama de multiplicación porque su característica fundamental es que no existe error en el RI de la escala, pero el error va aumentando progresivamente, y en forma lineal, a medida que se va acercando al RS (ver Fig. 6.1 (b)). El error de multiplicación también puede ser corregido mediante la calibración del instrumento (ajustando el tornillo de span).

Error de angularidad.

El error de angularidad está presente en instrumentos de transmisión mecánica del movimiento a la aguja de indicación de la variable medida. Este error se genera debido a que en la mitad de la escala, las barras transmisoras del movimiento no están formando un ángulo de 90° . Este error es máximo en el medio de la escala, y nulo en los extremos (ver Fig. 6.1 (c)), y puede ser corregido mediante la calibración del mecanismo de barras de transmisión del movimiento.

Error sistemático.

Es aquel que proviene de un defecto del instrumento, desgaste o de un ajuste inadecuado. Por lo tanto el error es casi siempre igual y del mismo signo, es decir predecible y repetitivo, y por lo tanto puede ser corregido. Los tres errores mencionados anteriormente pueden ser considerados como errores sistemáticos.

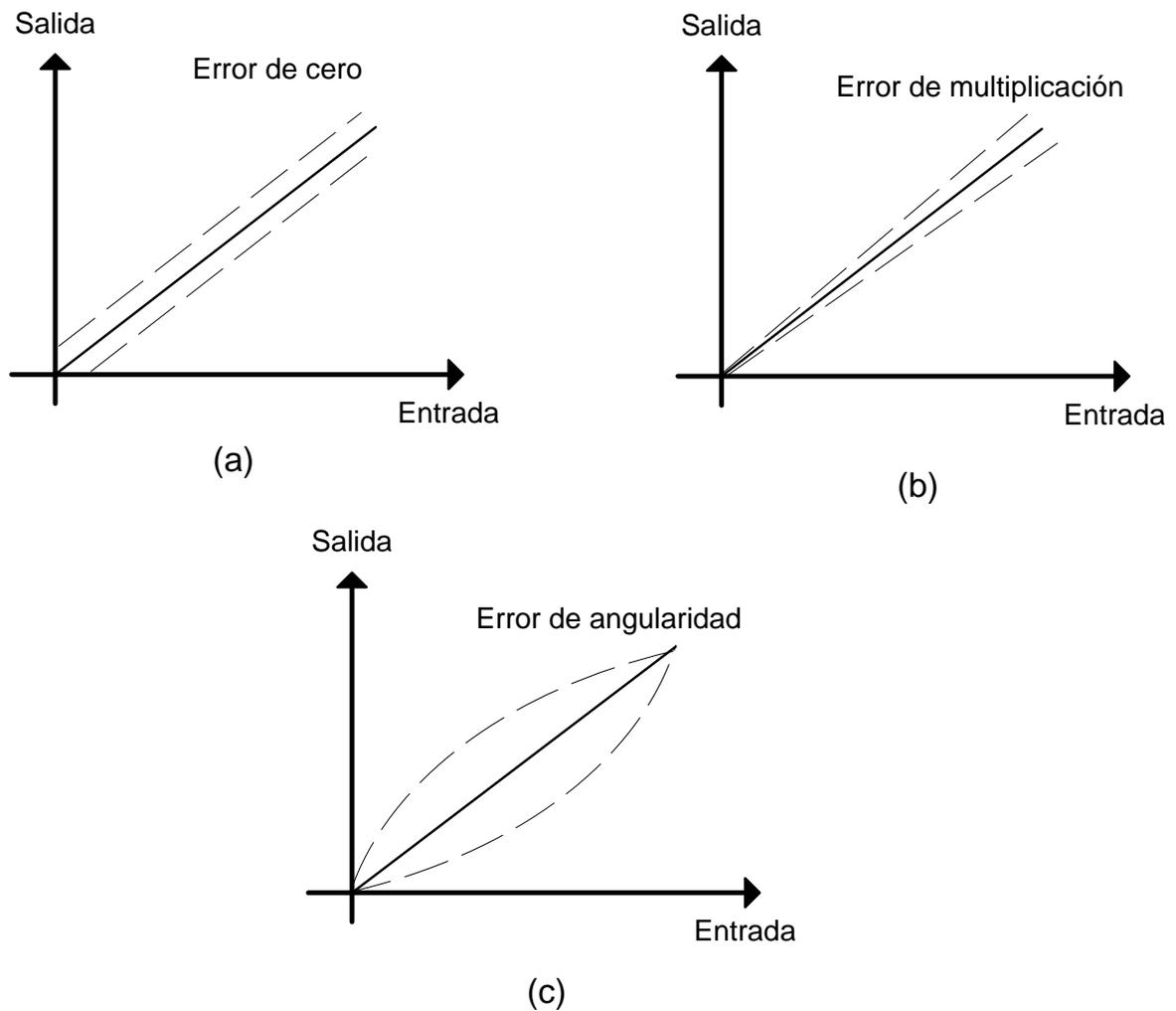


Figura 6.1. Errores en los instrumentos. (a) Error de cero. (b) Error de multiplicación. (c) Error de angularidad.

6.3.- Formas de expresar el error en una medición.

Básicamente, existen dos formas de expresar el error total en una medición: error absoluto, y error relativo.

Error absoluto.

Es la diferencia entre el valor verdadero de la magnitud V_r , y el valor obtenido por la medición V_m .

$$\varepsilon_a = |V_m - V_r| \quad (6.1)$$

Error relativo.

Es la razón entre el error absoluto, y el valor verdadero de la magnitud. El error relativo nos indica que tan grande es el error comparado con la magnitud medida.

$$\varepsilon_r = \left| \frac{\varepsilon_a}{V_r} \right| \quad (6.2)$$

6.4.- Estimación del error total en una medición.

Típicamente una medición completa involucra la utilización de varios instrumentos, cada uno de los cuales contribuye con su inexactitud en el error total de la medición. Adicionalmente, no sólo los instrumentos son fuente de error en una medición, también hay que considerar otros factores tales como variaciones en las condiciones ambientales, cambio de energía por interacción, etc.

Para el cálculo del error total en una medición se debe conocer el aporte individual de cada una de las fuentes de error significativas. Son dos los valores teóricos que interesa calcular referentes al error: el error máximo y el error probable.

6.4.1.- Error máximo en una medición.

Matemáticamente, una medición puede ser definida como una función en la que están involucradas varias variables, cada una aportando un error, es decir:

$$y = f(x_i) \quad (6.3)$$

donde:

y = medición
 x_i = variables medidas o valores constantes aportando error.

Por ejemplo, si para la determinación del valor de corriente que circula por cierta resistencia eléctrica (R) se está utilizando un voltímetro, entonces, el error en el cálculo de la corriente estará determinado por el aporte individual de la inexactitud del voltímetro y la tolerancia de la resistencia. En este caso: $I = V/R$.

Se puede demostrar, que si "y" es una función suave (continua en el tiempo), entonces el error absoluto en "y" (Δy), se puede calcular conociendo los errores absolutos de las variables de las que depende "y", a partir de la siguiente fórmula:

$$\Delta y = \left| \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_1} \right| \cdot |\Delta x_1| + \left| \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_2} \right| \cdot |\Delta x_2| + \dots + \left| \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_n} \right| \cdot |\Delta x_n| \quad (6.4)$$

donde:

Δx_i = Error absoluto de la variable x_i

El error relativo en la medición de "y" ($\Delta y/y$), se puede calcular a partir de la siguiente fórmula:

$$\frac{\Delta y}{y} = \left| \frac{\partial \ln f(x_i)}{\partial x_1} \right| \cdot |\Delta x_1| + \left| \frac{\partial \ln f(x_i)}{\partial x_2} \right| \cdot |\Delta x_2| + \dots + \left| \frac{\partial \ln f(x_i)}{\partial x_n} \right| \cdot |\Delta x_n| \quad (6.5)$$

Es importante resaltar, que las ecs. (6.4) y (6.5) se utilizan para calcular el error máximo en una medición, y que las mismas son sólo una aproximación válida cuando los errores individuales son muy pequeños.

😊 EJEMPLO 6.1.

Sea $y = x \cdot z$, calcular el error máximo relativo en "y", si se conocen los errores relativos de las variables "x" y "z".

 **Solución.**

Utilizando la ec. (6.5):

$$\frac{\Delta y}{y} = \left| \frac{\partial \ln y}{\partial x} \right| \cdot |\Delta x| + \left| \frac{\partial \ln y}{\partial z} \right| \cdot |\Delta z|$$

$$\frac{\Delta y}{y} = \left| \frac{z}{x \cdot z} \right| \cdot |\Delta x| + \left| \frac{x}{x \cdot z} \right| \cdot |\Delta z| = \left| \frac{\Delta x}{x} \right| + \left| \frac{\Delta z}{z} \right|$$

Se puede concluir que si las variables se multiplican entonces los errores relativos se suman.

😊 EJEMPLO 6.2.

Sea $y = x + z$, calcular el error máximo absoluto en "y", si se conocen los errores absolutos de las variables "x" y "z".

 **Solución.**

Utilizando la ec. (6.4):

$$\Delta y = \left| \frac{\partial y}{\partial x} \right| \cdot |\Delta x| + \left| \frac{\partial y}{\partial z} \right| \cdot |\Delta z|$$

$$\Delta y = |\Delta x| + |\Delta z|$$

Se puede concluir que si las variables se suman entonces los errores absolutos también se suman.

☺ **EJEMPLO 6.3.**

Sea $y = x^n$, calcular el error máximo relativo en "y", si se conoce el error relativo de la variable "x".

 **Solución.**

Utilizando la ec. (6.5):

$$\frac{\Delta y}{y} = \left| \frac{\partial \ln y}{\partial x} \right| \cdot |\Delta x|$$

$$\frac{\Delta y}{y} = \left| \frac{n \cdot x^{n-1}}{x^n} \right| \cdot |\Delta x| = \left| \frac{n \cdot \Delta x}{x} \right|$$

En este caso el error relativo máximo de una función del tipo x^n , es "n" veces el error en "x".

☺ **EJEMPLO 6.4.**

Dos instrumentos están conectados en serie, es decir, la salida del instrumento "A" está conectada a la entrada del instrumento "B". Si la medición se toma del instrumento "B", calcular el error total en la medición.

 **Solución.**

Si los instrumentos están conectados en serie, entonces la salida del instrumento "B" es igual a la entrada en el instrumento "A" multiplicada por la función de transferencia de los instrumento "A" y "B", es decir,

$$\text{Salida} = \text{Entrada} (G_a \cdot G_b)$$

donde:

G_a = Función de transferencia del instrumento "A".

G_b = Función de transferencia del instrumento "B".

Como cada instrumento es inexacto, entonces el error relativo máximo en la medición será la suma de los errores relativos de cada uno de los instrumentos (ver Ejemplo 6.1).

6.4.2.- Error probable en una medición.

Como los instrumentos no tienen al mismo tiempo su error máximo en todas las circunstancias de la medida, suele tomarse como error probable de una medición la raíz cuadrada de la suma algebraica de los cuadrados de los errores máximos de cada instrumento.

$$\varepsilon_p = \pm \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2} \quad (6.6)$$



EJERCICIOS.

PROBLEMA 6.1.

Se desea medir el nivel y el volumen de producto almacenado en un tanque cilíndrico. Para ello se dispone de dos transmisores de presión (PT-1 y PT-2). El transmisor PT-1 está colocado en el fondo del tanque, y el transmisor PT-2 está colocado $3 \text{ m} \pm 1 \text{ mm}$, por encima del transmisor PT-1. Si se conocen los siguientes datos:

- Exactitud de los transmisores de presión: 0,04% del Rango Superior.
- Rango de medición de los transmisores de presión: 0 a 30 psig
- Error en la medición del área del tanque: 0,1%
- Diámetro del tanque: 50 m
- Altura del tanque: 14 m

Calcule:

- a) La expresión del error máximo relativo y absoluto en la medición de nivel.
- b) La expresión del error máximo relativo y absoluto en la medición de volumen.
- c) Si el contenido del tanque es agua ($\rho=1\text{gr/cm}^3$), a que nivel se obtiene error absoluto y relativo máximo, y cuánto vale.

PROBLEMA 6.2.

Se dispone de dos termopares idénticos conectados en paralelo a un instrumento indicador de temperatura. Se conoce que la Exactitud de cada termopar es de $\pm 1^\circ\text{C}$ y que la Exactitud del indicador de temperatura es de $\pm 2\%$ de la lectura. Calcular el error relativo y absoluto en la medición, cuando ambos termopares están sometidos a una temperatura de 50°C . Nota: Dos termopares conectados en paralelo generan una señal equivalente al promedio de las temperaturas medidas

PROBLEMA 6.3.

Para calibrar un indicador de temperatura entre el rango de 100°C a 300°C se hicieron 5 mediciones al 0% al 50% y al 100% de la escala, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Calibración de un instrumento.

	0% (Escala)	50% (Escala)	100% (Escala)
# de la Medición	Valor medido (°C)	Valor medido (°C)	Valor medido (°C)
1	101	200	301
2	98	203	300
3	99	198	296
4	100	199	302
5	101	201	298

- a) Hallar la exactitud en función del valor más alejado.
- b) Hallar la exactitud en función de tres desviaciones estándar (3σ).
- c) Expresar la exactitud encontrada en el punto "b" en función del RS y en función del Span.

PROBLEMA 6.4.

Un transmisor de presión tiene una exactitud de $\pm 0,2\%$ del RS, y un RM de 5 a 15 PSI. Indicar el máximo error absoluto en la medición, debido a la inexactitud del instrumento, cuando se está midiendo al 100% y al 20% del rango de medición.

PROBLEMA 6.5.

Se desea medir la temperatura en una tubería, con el menor error posible, se sabe que en promedio, la temperatura en la tubería es de 32°C, la máxima temperatura es de 35°C, y la mínima de 25°C. Se dispone de dos instrumentos con las siguientes características:

	INSTRUMENTO "A"	INSTRUMENTO "B"
RANGO 1	0 A 40 °C	0 A 50 °C
RANGO 2	20 a 40°C	-----
RANGO 3	20 a 70 °C	-----
EXACTITUD	$\pm 1,5\%$ Span	$\pm 1\%$ del valor medido.

- a) Indique el instrumento y el rango de medición para obtener el menor error absoluto en la medición de temperatura promedio.

INSTRUMENTO: _____ RANGO DE MEDICIÓN: _____

- b) Indique el instrumento y el rango de calibración para obtener el menor error relativo (con respecto al valor real) en la medición de temperatura mínima.

INSTRUMENTO: _____ RANGO DE MEDICIÓN: _____

PROBLEMA 6.6.

Un instrumento que sensa la presión en el fondo de un tanque de agua, y envía una señal, por un lazo de corriente de 4 a 20 mA, proporcional al nivel de agua en el tanque, es un:

- Transductor de presión. Transmisor de presión Transductor de nivel.
 Transmisor de nivel Sensor de nivel. Ninguna de las anteriores.

PROBLEMA 6.7.

Se desea conocer el error en la medición de volumen en un tanque de almacenamiento de crudo de forma cilíndrica, de 14 m de altura y 100 m de diámetro. El sistema de medición utilizado, consta de un transmisor de nivel con un sensor de radar instalado en el techo del tanque a 15 m de altura del fondo. El transmisor mide la distancia entre la superficie de líquido y el techo del tanque, y envía la información a un sistema de medición y control, el cual se encarga de calcular el volumen. El transmisor de nivel tiene una exactitud de ± 2 mm. La medición de la altura del transmisor con respecto al fondo, se realizó con un error de ± 2 mm, y el error en la medición del área de la base del tanque fue de $\pm 0,15\%$ del área. A partir de los datos suministrados, calcule:

- La expresión del error relativo y absoluto en la medición de nivel.
- La expresión del error relativo y absoluto en la medición de volumen.
- A que nivel se obtiene el máximo error relativo y absoluto en la medición de nivel y volumen, y cuánto es. (Asuma que el nivel mínimo es de 50 Cm).

PROBLEMA 6.8.

Para medir el caudal de agua que circula por una tubería se instala una placa-orificio en la misma, y se mide el diferencial de presión originado. Se sabe que la placa fue calculada con un error de 1%, y que el instrumento que mide la presión diferencial tiene una exactitud de 0,5% FSD. A partir de los datos suministrados, calcule el error relativo máximo y probable al medir caudal al 100% y al 20% del rango de medición. Se conoce que la relación entre el caudal, el diferencial de presión y la resistencia hidráulica de la placa viene dada por la siguiente expresión:

$$Q = K\sqrt{h}$$

donde Q = Caudal, K = Resistencia hidráulica de la placa y h = Diferencial de presión desarrollado por la placa.

PROBLEMA 6.9.

El caudal de aire que circula por una tubería con una pérdida de carga de P, es según la fórmula de Poiseuille, para régimen laminar es:

$$Q = \frac{P \cdot \pi \cdot R^4}{8 \cdot \mu \cdot L}$$

donde:

Q_v = Caudal volumétrico

P = Caída de presión

μ = Viscosidad dinámica

L = Longitud del tubo

ρ = densidad

R = radio interior

Calcular el error total y relativo de la expresión de Q_v .

PROBLEMA 6.10.

Halle la expresión para el error relativo y el absoluto de la siguiente ecuación:

$$y(x, w, z) = \frac{(a \cdot x)^2 \cdot w}{b \cdot \ln z}$$

PROBLEMA 6.11.

Para medir el flujo de gas a la descarga de un compresor se utiliza un sensor que genera una presión diferencial que puede variar entre 5 "H₂O y 20 "H₂O. Se sabe que la presión de descarga del compresor es aproximadamente 2000 psig. La temperatura a la cual se encuentra operando el instrumento es en promedio 39 °C. Se desea determinar cual de los dos transmisores de presión cuyas especificaciones se anexan, es mejor utilizar para minimizar el error debido a la inexactitud, y en que rango de medición deben estar calibrados. La comparación se debe hacer tanto al 100% del rango de medición seleccionado, como al 10% del rango.

List Transmitter Specifications

SPECIFICATIONS	TRANSMITTER A	TRANSMITTER B
Upper Range Limit (URL)	300 inH ₂ O	300 inH ₂ O
Accuracy	0.2% of span	0.1% of URL
Temperature Effect		
Zero	0.5% of URL per 100°F	
Span	0.5% of span per 100°F	
Total*		1.0% of URL per 100°F
Static Pressure Effect		
Zero	0.25% of URL per 2000 psi	0.25% of URL per 2000psi
Span	0.25% of reading per 1000 psi	0.25% of span per 1000 psi
Total*		