

# INSTRUMENTOS INDUSTRIALES

SU AJUSTE Y  
CALIBRACIÓN

---

Antonio Creus

3a  
edición

 Alfaomega

 marcombo  
ediciones técnicas



**Instrumentos industriales,  
su ajuste y calibración**



# **Instrumentos industriales, su ajuste y calibración**

3a. Edición

**Antonio Creus Solé**  
Doctor Ingeniero Industrial

 **Alfaomega**

 **marcombo**  
ediciones técnicas

Datos catalográficos

Creus, Antonio  
Instrumentos industriales, su ajuste y calibración  
Tercera Edición  
Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México

ISBN: 978-607-7686-51-4

Formato: 17 x 23 cm

Páginas: 252

**Instrumentos industriales, su ajuste y calibración**

Antonio Creus Solé

ISBN: 978-84-267-1421-3, edición original publicada por MARCOMBO, S.A., Barcelona, España

Derechos reservados © MARCOMBO, S.A.

Tercera edición: Alfaomega Grupo Editor, México, abril 2009

© 2009 Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.

Pitágoras 1139, Col. Del Valle, 03100, México D.F.

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana

Registro No. 2317

Pág. Web: <http://www.alfaomega.com.mx>

E-mail: [atencionalcliente@alfaomega.com.mx](mailto:atencionalcliente@alfaomega.com.mx)

**ISBN: 978-607-7686-51-4**

**Derechos reservados:**

Esta obra es propiedad intelectual de su autor y los derechos de publicación en lengua española han sido legalmente transferidos al editor. Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin permiso por escrito del propietario de los derechos del copyright.

**Nota importante:**

La información contenida en esta obra tiene un fin exclusivamente didáctico y, por lo tanto, no está previsto su aprovechamiento a nivel profesional o industrial. Las indicaciones técnicas y programas incluidos, han sido elaborados con gran cuidado por el autor y reproducidos bajo estrictas normas de control. ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. de C.V. no será jurídicamente responsable por: errores u omisiones; daños y perjuicios que se pudieran atribuir al uso de la información comprendida en este libro, ni por la utilización indebida que pudiera dársele.

Edición autorizada para venta en México y todo el continente americano.

**Impreso en México. Printed in Mexico.**

**Empresas del grupo:**

**México:** Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. – Pitágoras 1139, Col. Del Valle, México, D.F. – C.P. 03100.

Tel.: (52-55) 5089-7740 – Fax: (52-55) 5575-2420 / 2490. Sin costo: 01-800-020-4396

E-mail: [atencionalcliente@alfaomega.com.mx](mailto:atencionalcliente@alfaomega.com.mx)

**Colombia:** Alfaomega Colombiana S.A. – Carrera 15 No. 64 A 29 – PBX (57-1) 2100122, Bogotá,

Colombia, Fax: (57-1) 6068648 – E-mail: [sciente@alfaomega.com.co](mailto:sciente@alfaomega.com.co)

**Chile:** Alfaomega Grupo Editor, S.A. – General del Canto 370-Providencia, Santiago, Chile

Tel.: (56-2) 235-4248 – Fax: (56-2) 235-5786 – E-mail: [agechile@alfaomega.cl](mailto:agechile@alfaomega.cl)

**Argentina:** Alfaomega Grupo Editor Argentino, S.A. – Paraguay 1307 P.B. “11”, Buenos Aires,

Argentina, C.P. 1057 – Tel.: (54-11) 4811-7183 / 8352, E-mail: [ventas@alfaomegaeditor.com.ar](mailto:ventas@alfaomegaeditor.com.ar)

*A mi hija Ariadna*



## EL AUTOR

*Antonio, Creus Solé* es Doctor Ingeniero Industrial (1963) por la ETSIIB y Licenciado en Medicina y Cirugía por la Facultad de Medicina de Barcelona en 1984. De 1963 a 1968 trabajó en Glucosa y Derivados como Jefe de Instrumentación de la nueva planta de Martorell, participando en el proyecto, instalación y puesta en marcha, en colaboración con el equipo técnico, de instrumentos de Técnicas Reunidas.

De 1968 a 1985 estuvo en el Grupo Industrial de Honeywell como Director de la Delegación de Barcelona y en el Departamento de Electromedicina. Actualmente, forma parte del Departamento de Relaciones Empresariales e Institucionales de la ETSEIB y de la Fundación Universitaria Iberoamericana (FUNIBER) en la formación permanente de cursos a medida de la industria.

Además de la presente obra y de numerosos artículos para revistas especializadas, es autor de las obras *Simulación y control de procesos por ordenador*, *Fiabilidad y seguridad industrial*, *Control de procesos industriales*, *Simulación de procesos con PC*, *Fiabilidad y seguridad de procesos industriales* (estas tres últimas dentro de la colección *Productiva*), *Neumática e Hidráulica* publicadas todas ellas por Marcombo. Es autor, además, del libro *Informática para Médicos* de la editorial Gustavo Gili, *Iniciación a la Aeronáutica* de Ediciones L'Aeroteca, *Energías renovables*, *Previsión de riesgos laborales* y *Energía Geotérmica de Baja Temperatura* de la Editorial CEYSA.

## AGRADECIMIENTOS

Este libro ha sido posible gracias a 28 años de experiencia industrial en contacto con fábricas, en puestas en marcha y mantenimiento con una visión directa de las máquinas de proceso y de su control.

Desde el punto de vista industrial, unas palabras de agradecimiento a las empresas CERESTAR y HONEYWELL por la experiencia acumulada durante los 25 años de trabajo como responsable de control y automatismos, que me han permitido tener una amplia visión de los procesos industriales y el ajuste y calibración de los instrumentos.



## PRÓLOGO

Los instrumentos de medición y control son ampliamente utilizados en la industria. En líneas generales, el porcentaje económico que ocupan en la inversión de una planta de proceso varía desde un 3% en plantas con poca instrumentación hasta un 8% - 10% en plantas totalmente automatizadas.

De aquí que sea importante que los instrumentos estén en perfecto estado de funcionamiento, a fin de evitar paros parciales o totales en la planta o reducir, al máximo, el coste del mantenimiento. Los instrumentos permiten garantizar la calidad de los productos terminados y aseguran su producción masiva, manteniendo una buena repetitividad de sus características finales.

Por otro lado, la mayoría de empresas se encuentran dentro de la norma ISO 9000:2000. Dentro de esta norma, la realización del producto y las mediciones para garantizar su calidad de acuerdo con los requisitos del cliente, corresponden a la empresa atendiendo a las variables críticas del proceso de fabricación. El sistema de calidad ISO 9001 establece que el suministrador de un producto debe aportar una confirmación metrológica (conjunto de operaciones necesarias para asegurar que el equipo de medición cumple con los requisitos para su uso previsto) de las variables críticas de su proceso. Esto presupone la redacción de manuales de calibración de los instrumentos afectados, la creación de procedimientos documentados para la calibración y la conformidad o no-conformidad de los instrumentos y equipos de calibración, el entrenamiento del personal destinado a la calibración ISO 9001 y la creación de un área separada, dentro del taller de instrumentos, donde se encontrarán ubicados los equipos y herramientas de calibración.

El período de calibración de cada instrumento es fijado por la propia empresa, de acuerdo con la experiencia que posea sobre el trabajo en la planta. Normalmente, suele ser de un año para los aparatos normales.

El libro está dirigido a los jefes y operadores de procesos, a los usuarios, al estudiante y a toda persona que esté relacionada, directa o indirectamente, con el mantenimiento de los instrumentos industriales. La obra consta de seis capítulos y un apéndice.

En el primer capítulo se examinan las características de los instrumentos, su calibración, ejemplos de características, un método general de calibración y el código e identificación de instrumentos.

En el segundo capítulo se estudian los transmisores neumáticos, electrónicos y digitales, las comunicaciones y los calibradores de los transmisores según HART y FIELDBUS.

En el tercer capítulo se examina la calibración de los instrumentos de medición de las variables, presión, caudal, nivel, temperatura y otras variables con una descripción de los patrones utilizados.

En el cuarto capítulo se estudia la calibración de las válvulas de control, con la descripción de los posicionadores inteligentes que permiten hacer un diagnóstico del estado de la válvula y los tipos de mantenimiento.

En el quinto capítulo se estudia el ajuste de los controladores para sintonizarlos con el proceso y la calibración de los instrumentos de control digitales.

En el sexto capítulo se examinan los tipos de mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo, la seguridad y fiabilidad de los instrumentos, la frecuencia de mantenimiento y la normativa de calidad ISO 9000:2000 aplicada a la instrumentación.

Finalmente, en el apéndice figuran los diagramas de tuberías e instrumentos, lazos de control, colores de visualización de los procesos, hojas de especificación y calibración de los instrumentos y ejemplos de procedimientos de calibración de un manómetro digital, un transmisor electrónico de temperatura, una válvula de control digital y transmisores inteligentes según comunicaciones HART y FIELDBUS. El apéndice termina con un glosario de términos y una lista de referencias.

Espero que la obra cumpla el objetivo de una mejor comprensión del mantenimiento actual de los instrumentos, y que favorezca la aplicación, en particular, del mantenimiento predictivo y que contribuya a la formación especializada del personal de instrumentación.

# Contenido

## Capítulo 1

### Generalidades

1.1	Introducción.....	1
1.2	Características de los instrumentos .....	6
1.2.1	Generalidades .....	6
1.2.2	Campo de medida ( <i>range</i> ) .....	6
1.2.3	Alcance ( <i>span</i> ) .....	6
1.2.4	Error.....	7
1.2.5	Exactitud ( <i>accuracy</i> ) .....	10
1.2.6	Precisión .....	12
1.2.7	Incertidumbre de la medida ( <i>uncertainty</i> ).....	13
1.2.7.1	Generalidades.....	13
1.2.8	Trazabilidad ( <i>traceability</i> ).....	28
1.2.9	Zona muerta ( <i>dead zone o dead band</i> ).....	30
1.2.10	Sensibilidad ( <i>sensitivity</i> ) .....	30
1.2.11	Repetibilidad ( <i>repeatability</i> ).....	30
1.2.12	Histéresis ( <i>hysteresis</i> ) .....	32
1.2.13	Linealidad .....	32
1.2.14	Otros términos.....	32
1.3	Calibración de un instrumento .....	34
1.3.1	Generalidades .....	34
1.3.2	Expresión de la incertidumbre de medida en los certificados de calibración....	35
1.3.3	Certificado de calibración .....	36
1.3.4	Programas de cálculo de incertidumbres.....	37
1.4	Ejemplos generales de características de instrumentos.....	38
1.5	Cómo se descalibran los instrumentos.....	39
1.5.1	Generalidades .....	39
1.5.2	Tipos de errores.....	40
1.6	Método general de calibración .....	42

1.7 Código e identificación de los instrumentos .....	47
1.7.1 Clases de instrumentos.....	47

## Capítulo 2

### Transmisores

2.1 Generalidades .....	55
2.2 Transmisores neumáticos .....	56
2.3 Transmisores electrónicos .....	56
2.4 Transmisores digitales .....	58
2.4.1 Generalidades.....	58
2.4.2 Transmisor inteligente capacitivo.....	61
2.4.3 Transmisor inteligente piezorresistivo .....	61
2.5 Comunicaciones .....	62
2.5.1 Generalidades.....	62
2.5.2 Protocolos serie.....	63
2.5.3 Protocolos híbridos .....	64
2.5.4 Protocolos abiertos .....	66
2.6 Tabla comparativa de transmisores .....	72
2.7 Calibradores de transmisores .....	73
2.7.1 Generalidades.....	73
2.7.2 Calibradores de instrumentos HART .....	74
2.7.3 Calibradores de instrumentos Fieldbus.....	78
2.8 Calibración y monitorización de instrumentos transmisores en línea ..	78

## Capítulo 3

### Calibración de instrumentos de medición de variables

3.1 Generalidades .....	83
3.2 Calibradores simples universales neumáticos y electrónicos .....	83
3.2.1 Calibradores neumáticos .....	83
3.2.2 Calibradores electrónicos.....	84
3.2.3 Calibradores multifunción (presión y temperatura) .....	85
3.3 Calibradores de presión.....	86
3.4 Calibradores de caudal .....	93
3.4.1 Instrumentos de presión diferencial .....	93

3.4.2	Rotámetros .....	95
3.4.3	Vertedero .....	98
3.4.4	Medidores de turbina.....	98
3.4.5	Medidor de torbellino y Vortex .....	99
3.4.6	Medidor magnético de caudal.....	100
3.4.7	Medidor de Coriolis.....	101
3.4.8	Medidores volumétricos.....	101
3.4.9	Medidores de caudal masa .....	101
3.4.10	Patrones internacionales de calibración de medidores de caudal de líquidos .....	102
3.4.11	Patrones internacionales de calibración de medidores de caudal de agua .....	103
3.4.12	Patrones internacionales de calibración de medidores de caudal de gas.....	105
3.5	Nivel.....	107
3.5.1	Instrumentos de medida directa .....	107
3.5.2	Instrumentos de presión hidrostática .....	107
3.5.3	Instrumentos de presión diferencial .....	107
3.5.4	Instrumentos de desplazamiento .....	109
3.5.5	Instrumentos basado en características eléctricas del líquido .....	110
3.5.6	Instrumentos de radiación .....	110
3.6	Instrumentos de temperatura.....	110
3.6.1	Calibradores y patrones .....	110
3.6.2	Calibración de sondas de resistencia e instrumentos de puente de Wheatstone.....	114
3.6.3	Termistores .....	120
3.6.4	Calibración de termopares e instrumentos de temperatura.....	121
3.6.5	Calibración de pirómetros de radiación .....	133
3.6.6	Calibradores universales de temperatura.....	135
3.7	Calibración de instrumentos para otras variables.....	138

## Capítulo 4

### Calibración de válvulas de control

4.1	Generalidades .....	141
4.2	Calibración de la válvula de control .....	142
4.3	Calibración de posicionadores .....	144

4.4 Posicionador inteligente y diagnóstico de la válvula.....	146
4.5 Tipos de mantenimiento.....	152

## Capítulo 5

### Calibración de controladores

5.1 Generalidades .....	155
5.2 Ajuste de controladores .....	157
5.2.1 Generalidades.....	157
5.2.2 Método de tanteo (lazo cerrado) .....	159
5.2.3 Método de ganancia límite (lazo cerrado) .....	161
5.2.4 Método de curva de reacción (lazo abierto) .....	162
5.2.5 Método de Cohen-Coon.....	164
5.2.6 Procesos no lineales.....	165
5.3 Calibración de instrumentos digitales .....	166

## Capítulo 6

### Tipos de mantenimiento

6.1 Generalidades .....	169
6.1.1 Mantenimiento correctivo.....	169
6.1.2 Mantenimiento preventivo .....	169
6.1.3 Mantenimiento predictivo .....	170
6.2 Seguridad y fiabilidad de los instrumentos .....	172
6.2.1 Generalidades.....	172
6.2.2 Nivel integral de seguridad (SIL) .....	174
6.2.3 Circuitos digitales de tolerancia de fallos.....	175
6.3 Frecuencia de mantenimiento de los instrumentos .....	178
6.4 Normativa de calidad ISO 9000:2000 aplicada a la instrumentación .....	179

## Apéndice

A.1 Diagramas de tuberías e instrumentos (P&IDs) .....	183
A.2 Diagramas de lazos de control .....	185
A.3 Colores de visualización de procesos .....	188

A.4	Hojas de especificación de instrumentos .....	189
A.4.1	Instrumentos de presión .....	189
A.4.2	Instrumentos de caudal .....	192
A.4.3	Instrumentos de nivel.....	196
A.4.4	Instrumentos de temperatura .....	197
A.4.5	Instrumentos de otras variables .....	198
A.4.6	Válvulas de control .....	201
A5.	Hojas de calibración .....	202
A.6	Procedimientos de calibración .....	204
A.6.1	Calibración de un manómetro digital.....	204
A.6.2	Calibración de un transmisor electrónico de temperatura con elemento de termopar tipo K de 2 hilos.....	206
A.6.3	Calibración de una válvula de control digital (protocolo HART) .....	207
A.6.4	Calibración de un transmisor inteligente (protocolos HART y FIELDBUS).....	208
A.7	Glosario .....	213
A.8	Referencias .....	226



# Capítulo

# 1

## Generalidades

### 1.1 Introducción

En esta parte introductoria al tema de la calibración se describirá de manera resumida cada uno de los conceptos importantes relacionados con la calibración de los instrumentos. En los siguientes párrafos se ampliarán las explicaciones para su correcta asimilación por parte del lector, ya que la experiencia demuestra que son conceptos un poco difíciles de asimilar.

Los procesos industriales exigen el control de la fabricación de los diversos productos obtenidos con el objetivo de conseguir una mejora continua orientada a que el cliente se sienta satisfecho. Es decir, dentro del proceso de fabricación los clientes y otras partes interesadas hacen sentir sus necesidades, las que se incorporan al producto (Modelo de gestión de calidad ISO 9000:2000).

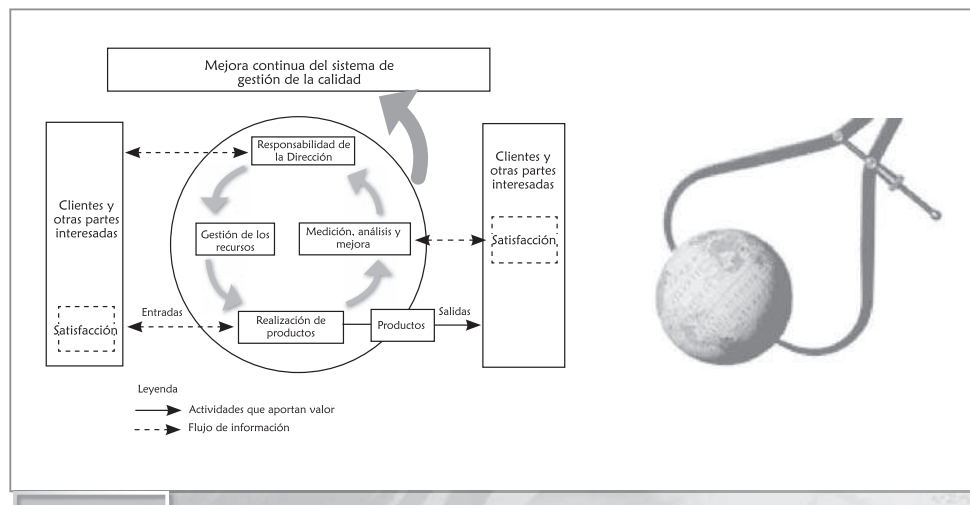


Figura 1.1

Modelo de gestión de calidad ISO 9000:2000.

La fabricación del producto y las mediciones para garantizar su calidad corresponden a la empresa, atendiendo a las variables críticas del proceso de fabricación. Por tanto, la necesidad de medir bien ha conducido a la ciencia metrológica (del griego *μετρον*, medida, y *λογος*, tratado) que tiene por objeto el estudio de los sistemas de pesos y medidas y la determinación de las magnitudes físicas.

Medir “bien” no es sólo medir con cuidado, o utilizando el procedimiento y los instrumentos adecuados, sino que además las unidades de medida deben ser equivalentes, de tal modo que 1 cm sea lo mismo en cualquier país del mundo. La infraestructura metrológica de cada país debe ser compatible y estar ligada a las infraestructuras metrológicas de otros países, y para ello cada país debe disponer de laboratorios donde se puedan calibrar los instrumentos de medición. La compatibilidad entre países se asegura mediante comparaciones periódicas de los patrones de medida. Todo este proceso se llama *trazabilidad*.

Dentro de la metrología se sitúa la *calibración*. *Calibración* es simplemente el procedimiento de comparación entre lo que indica un instrumento y lo que “debiera indicar” de acuerdo con un patrón de referencia con valor conocido.

Por ejemplo: valor de referencia de un manómetro patrón = 0,5 bar. Valor indicado del instrumento = 0,495 bar. Si la diferencia  $0,5 - 0,495 = 0,005$  bar se encuentra dentro de la exactitud del instrumento (escala 0 – 10 bar y exactitud  $\pm 0,5\%$ , lo que da  $\pm 0,05$  bar), no es necesario realizar ninguna operación de calibración.

Ahora bien, si el valor indicado hubiera sido, por ejemplo, 0,41, la diferencia sería de  $0,5 - 0,41 = 0,09$ , que ya es mayor que el valor límite de 0,05 bar dado por el fabricante del instrumento, y sería necesario calibrar dicho instrumento. Se entiende que la comparación se haría en varios puntos de la escala.

Una definición de calibración más completa sería:

Proceso de comparación periódica entre uno o varios instrumentos de exactitud no verificada, con un instrumento de medida patrón o un sistema de exactitud conocida, con el objeto de asegurar una exactitud especificada trazable según normas internacionales.

Entendemos pues por *calibración*, las operaciones a realizar en un instrumento para que sus indicaciones vuelvan a estar dentro de los valores límite dados por el fabricante.

Los procedimientos de *calibración* pueden ser genéricos, por ejemplo, válidos para instrumentos de presión, sean manómetros, transmisores de presión, etc., o específicos para un instrumento determinado de un fabricante. En este último caso, será necesario seguir con detalle los procedimientos dados por el fabricante en su manual.

Por otro lado, los procedimientos de *calibración* que se van a dar en el libro no corresponderán necesariamente a los específicos seguidos por los laboratorios, aunque pueden ser semejantes.

Los resultados de la *calibración* son informados en un documento llamado Certificado de calibración. Algunos instrumentistas veteranos de la vieja escuela no creen en la necesidad de los certificados de calibración, con el argumento de que siempre han calibrado los instrumentos sin papeleo. La respuesta es que hoy en día la calibración debe ser documentada. Todo el mundo está prácticamente dentro de

las normas de calidad ISO y todos los clientes quieren asegurarse de la calidad de los productos fabricados con base en los instrumentos de proceso. Por otro lado, si no se procede de este modo, es seguro que tarde o temprano la empresa desaparecerá, ya que sus clientes la abandonarán si no cumple las normas de calidad.

La calibración periódica de los instrumentos de una planta de proceso asegura el aumento del rendimiento de la fabricación gracias a la reducción del número de rechazos del producto fabricado. Cuando se calibra un instrumento esto debe hacerse con una tolerancia especificada. Ahora bien, debe diferenciarse entre exactitud y tolerancia.

*Exactitud* es la relación entre el error y la señal de salida en toda la escala, o bien es la relación entre el error y la salida, expresado en porcentaje de la escala o bien porcentaje de la lectura.

*Tolerancia* es la desviación permitida con relación a un valor especificado y puede expresarse en las unidades de la medida, en el porcentaje del intervalo de medida o en el porcentaje de la lectura.

Por ejemplo, un transmisor electrónico de presión de 0 – 100 bar (0 - 10.000 kPa) con señal de salida de 4 – 20 mA c.c., tiene una tolerancia de calibración especificada de  $\pm 0,5$  bar (50 kPa). La tolerancia de salida será:

$$\frac{0,5 \text{ bar} * (20 - 4) \text{ mA}}{100 \text{ bar}} = 0,08 \text{ mA}$$

Por tanto, la tolerancia será  $\pm 0,5$  bar o  $\pm 0,08$  mA que deberán incluirse en la hoja de calibración.

Por otro lado, la exactitud del instrumento dada por el fabricante es de  $\pm 0,25\%$  de toda la escala, es decir,  $\pm 0,25 * 100 \text{ bar} = \pm 0,25 \text{ bar}$  (25 kPa).

En este ejemplo, mientras la exactitud es de  $\pm 0,25 \text{ bar}$  (25 kPa), la tolerancia es de  $\pm 0,5 \text{ bar}$  (50 kPa) o  $\pm 0,08 \text{ mA}$ .

Lógicamente, la tolerancia vendrá dada por el proceso, por la capacidad del equipo de calibración, por la consistencia o comparación con los demás instrumentos del proceso y por la tolerancia especificada por el fabricante. La tolerancia debe estar entre los requerimientos del proceso y la tolerancia especificada por el fabricante. En el ejemplo anterior podría ser un valor comprendido entre  $\pm 0,25 \text{ bar}$  (25 kPa) y  $\pm 0,5 \text{ bar}$  (50 kPa).

Uno de los motivos por los cuales la tolerancia es mayor que la exactitud es porque la presión del proceso puede ser una variable crítica para cumplir con la norma de calidad ISO9000:2000, pero el técnico de proceso considera que es suficiente asegurar que la presión se encuentre dentro del intervalo  $\pm 0,5 \text{ bar}$  (50 kPa), con relación al valor de lectura o de señal de salida del instrumento transmisor electrónico de presión.

Además, el equipo de calibración debe ser capaz de trabajar con la tolerancia especificada. Podría ser, por ejemplo,  $\pm 0,3 \text{ bar}$  (30 kPa) para ser consistente con los demás instrumentos de presión de la planta y además cumplir con la regla 4:1 de relación entre la exactitud del aparato patrón y la del instrumento a calibrar. En este caso la exactitud del patrón debería ser de  $\pm 0,3/4 = \pm 0,075 \text{ bar}$  ( $\pm 30/4 = \pm 7,5 \text{ kPa}$ ),

con lo que el instrumento patrón sería 4 veces más exacto que el instrumento que se calibra y es menos probable que la calibración tenga errores inaceptables.

La calibración debe ser *trazable*, es decir, debe poder relacionarse con las normas adecuadas, nacionales o internacionales, a través de una cadena continua de comparaciones (ANSI/NCSL Z540-1-1994).

La trazabilidad queda asegurada si los equipos que una empresa utiliza en las operaciones de calibración de sus instrumentos son calibrados en forma rutinaria por equipos de referencia normalizados de alto nivel.

Lo que hace la empresa es enviar periódicamente sus equipos de calibración a un laboratorio de calibración acreditado que dispone de un equipo de ensayo mucho más preciso, y a su vez, los equipos de este laboratorio son calibrados por los Equipos Primarios Estándar mantenidos por los Institutos Tecnológicos de Normalización (ENAC -Entidad Nacional de Acreditación-, NIST -Nacional Institute for Standard and Technology) que evalúan la competencia técnica de los organismos de evaluación de la conformidad (laboratorios, entidades de inspección y de certificación).

Los organismos de acreditación son:

Internacionales:	ISO, CEN (normalización), etc.
España:	AENOR y ENAC (Entidad Nacional de Acreditación)
Francia:	COFRAC
Portugal:	IPQ
Alemania:	DAR
Italia:	SINAL
Reino Unido:	UKAS
A nivel Europeo:	ISO, CEN (Comité Europeo de Normalización), etc.

Finalmente, la *incertidumbre* es el parámetro asociado con el resultado de la medida que caracteriza la dispersión de los valores ocasionada razonablemente por el *mensurando*, es decir, la magnitud particular sujeta a medición o la magnitud medida por un instrumento (cantidad que se ha medido); por ejemplo, la temperatura de un líquido contenido en un tanque.

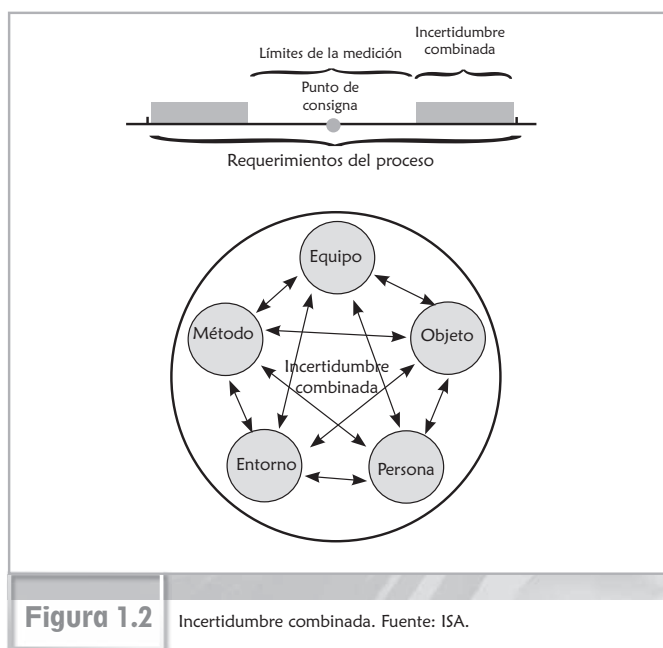
La incertidumbre es una medida de la calidad de la medida y proporciona los medios para minimizar el riesgo y las posibles consecuencias de pobres decisiones relacionadas con los valores indicados, transmitidos o controlados por los instrumentos.

Entre las fuentes de incertidumbre se encuentran:

- Influencia de las condiciones ambientales.
- Lecturas diferentes de instrumentos analógicos realizadas por los operadores.
- Variaciones en las observaciones repetidas de la medida en condiciones aparentemente idénticas.
- Valores inexactos de los instrumentos patrón.
- Muestra del producto no representativa. Por ejemplo, en la medida de temperatura con un termómetro patrón de vidrio la masa del bulbo cambia la temperatura de la muestra del proceso cuya temperatura desea medirse.

La incertidumbre se compone de un campo de valores, dentro del cual se encuentra el valor verdadero del mensurando. Es realmente una acumulación de errores desconocidos, como si fuera un cajón de sastre de los errores. Cuantos más términos se requieran para definir una medida, más incertidumbres se introducirán y si estos términos están elevados a una potencia, cuanto mayor sea esta más elevada será la incertidumbre.

Se expresa en la forma de barras de error en un gráfico o bien como  $\pm$  valor.



**Figura 1.2**

Incertidumbre combinada. Fuente: ISA.

Por ejemplo, si una temperatura se expresa como  $50\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ , la incertidumbre es  $\pm 2\text{ °C}$ , lo que significa que la temperatura verdadera puede ser cualquier valor comprendido entre  $48\text{ °C}$  y  $52\text{ °C}$ . Cuanto más pequeña es la incertidumbre, más exactas serán las medidas y más fácil será alcanzar el límite de control del proceso, siendo posible fabricar el producto en la forma más eficiente.

Si por desidia o descuido o por no calibrar periódicamente los instrumentos no se determinan las incertidumbres, las consecuencias en el proceso pueden ser un gasto elevado de energía y de material improductivo.

Una baja incertidumbre implica una alta exactitud y permite:

- Obtener productos más homogéneos del proceso gracias a una tolerancia más estrecha.
- Ampliar los límites de medida y hacer que la marcha del proceso sea más suave, ahorrando así costes de mantenimiento.
- Optimizar el proceso en lo posible.

- Ahorrar dinero en equipo de control de proceso más caro.

Hay varias formas de hacer mínimas las incertidumbres:

1. Equipo. Selección correcta del equipo de calibración, lo que significa la adquisición de equipo de calibración fiable y de alta exactitud, que además va a permitir ampliar el tiempo entre calibraciones de los sensores y un ahorro de horas-hombre en mantenimiento.
2. Reducir o eliminar el impacto que el sensor ejerce sobre el calibrador.
3. Entrenar bien al instrumentista.
4. Reducir los efectos del entorno ambiental (temperatura, humedad, cambios en la potencia de alimentación) al valor de referencia del calibrador.
5. Seleccionar bien el método que se utiliza en la calibración.

Los documentos que expresan la incertidumbre de medida en calibración son:

WECC doc. nº 19 (1990)  
EAL - R2 (1997)  
EA - 4/02(2000)

## 1.2 Características de los instrumentos

### 1.2.1 Generalidades

Los instrumentos de medición y control empleados en las industrias de proceso como química, petroquímica, alimenticia, metalúrgica, energética, textil, papel, etc., tienen su propia terminología que define sus características propias de medida y de control. Estos instrumentos pueden ser indicadores, registradores, controladores, transmisores y válvulas de control.

### 1.2.2 Campo de medida (*range*)

Espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida, de recepción o de transmisión del instrumento. Viene expresado estableciendo los dos valores extremos. Ejemplo: un manómetro de intervalo de medida 0 - 10 bar (0 - 1.000 kPa), un transmisor de presión electrónico de 0 - 25 bar (0 - 2.500 kPa) con señal de salida 4 - 20 mA c.c. o un instrumento de temperatura de 100 - 300 °C.

Otro término derivado es *dinámica de medida o rangeabilidad (rangeability)*, que es el cociente entre el valor de medida superior e inferior de un instrumento. Por ejemplo, una válvula de control lineal que regule linealmente el caudal desde 2% hasta 100% de su carrera tendrá una rangeabilidad de  $100/2 = 50$ .

### 1.2.3 Alcance (*span*)

Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento. En los ejemplos anteriores es de 10 bar (1.000 kPa) para el manómetro,

de 25 bar (2.500 kPa) para el transmisor de presión y de 200 °C para el instrumento de temperatura.

#### 1.2.4 Error

La cantidad determinada en un proceso de medida se llama *mensurando* (measurand). La especificación completa del *mensurando*, es decir, lo que se ha medido, requiere especificar las variables (presión, temperatura, humedad, ...) que pueden afectar su valor. Por ejemplo, en la medición de la densidad de un gas a 15 °C y 1 bar (100 kPa) de presión, el *mensurando* es “densidad del gas a 15 °C y 1 bar (1.000 kPa)”, lo que evidencia que la temperatura y la presión pueden afectar la cantidad medida (*mensurando*).

Si el proceso está en condiciones de régimen permanente existe el llamado *error estático*. En condiciones dinámicas el error varía considerablemente debido a que los instrumentos tienen características comunes a los sistemas físicos: absorben energía del proceso y esta transferencia requiere cierto tiempo para ser transmitida, lo cual da lugar a retardos en la lectura del aparato (*error dinámico*). En lo que sigue se estudiará el error estático.

El verdadero valor del *mensurando* está libre de errores, es decir, que es un valor verdadero. Por ejemplo, la densidad de una sustancia es la relación entre su masa y su volumen. Si fuera posible determinar la masa y el volumen sin tener errores de medida, entonces sería posible tener el valor verdadero de la densidad. Pero como esto no es posible, se infiere que no puede obtenerse el verdadero valor de la densidad, es decir, generalizando, no es posible obtener experimentalmente el verdadero valor de una cantidad.

El *valor nominal* es un valor aproximado redondeado de la medida de un material o de la característica de un instrumento de medida. Por ejemplo, un peso patrón de valor nominal 1 Kg tiene un peso verdadero de 0,9999 Kg.

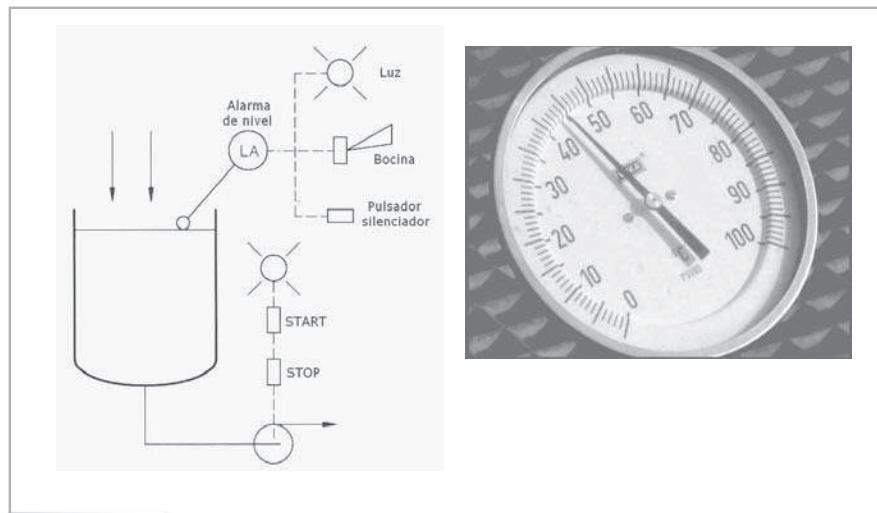
El valor verdadero convencional se obtiene por comparación con un patrón de alta calidad y en condiciones determinadas. Por ejemplo, el valor convencional del peso de 1 Kg es: 1.001 gramos  $\pm$  0,001 gramos, es decir, está comprendido entre 1.000 gramos y 1.002 gramos. Y su masa aparente se determinó utilizando pesos patrones en aire de densidad 1,2 kg/m<sup>3</sup> a 20 °C.

El valor del error siempre es desconocido, pero se puede acotar estimando su incertidumbre. Es decir, si existen errores de importancia desconocida, en vez de utilizar la palabra error debe más bien hablarse de incertidumbre. Siempre que una incertidumbre puede cuantificarse se convierte en un error y puede compensarse.

Los diferentes tipos de errores de cualquier causa, conocida o desconocida, se manifiestan a través del operador, del instrumento, del *mensurando* y de los agentes externos.

**Operador.** En los instrumentos de lectura no digital, los datos se obtienen de una lectura sobre escalas. De estas lecturas resultan errores de apreciación, interpolación, coincidencia, etc. Si además las escalas o elementos que componen estos sistemas de lectura están situados en diferentes planos, aparece el error de paralelaje cuando la visual del operador no es perpendicular a estos planos. Y así,

un operador optimista lee 5,5 y el pesimista 5 cuando el valor indicado es 5,25. Y si el operador está cansado, y tiene algo de dislexia, es posible que lea 6 en vez de 9.



**Figura 1.3** Errores del operador (paralaje y lectura errónea).

Por otro lado, una situación del proceso en la que se presente una alarma obliga al operador a leer un mensaje de alarma, diagnosticar la causa de la misma, y finalmente llevar a cabo la respuesta adecuada. Pero es posible que lea mal el código (tag) o la descripción de la alarma, con lo cual hará un diagnóstico equivocado de la situación, no llegará a la eliminación de la alarma y además dependiendo de cómo sea el proceso pueden desencadenarse una serie de situaciones catastróficas causa-efecto.

La tendencia existente para evitar esta causa de error consiste en la utilización de instrumentos de medida en los que se elimine al máximo la intervención del operador, por ejemplo, los digitales, si bien aquí todavía podrían presentarse el error de redondeo optimista o pesimista y el de dislexia.

**Instrumento.** Puede tener un error de deriva (aumenta con el tiempo), un error de fabricación y errores por desgaste debido a vibraciones, corrosión química, etc.

**Mensurando.** La variable que se mide puede influir en el instrumento de medida. Por ejemplo, la variación de composición del petróleo según su origen puede afectar las variables de control de una refinera.

**Agentes externos.** Las variaciones de densidad de un líquido hacen que varíe la indicación del nivel medido con transmisores que tienen en cuenta la densidad, aunque de hecho no se aprecie visualmente dicha variación.

Por otro lado, en la medida de temperatura con un termopar con vaina, en tratamientos térmicos con gases, puede ocurrir que el gas difunda a través de los poros de la vaina y ataque químicamente el hilo del termopar (fenómeno de envejecimiento), con lo que éste dejará de cumplir la relación temperatura-f.e.m. y el instrumento indicará valores que no tendrán nada que ver con la temperatura.

Las vibraciones pueden desgastar el mecanismo de movimiento de la aguja de un manómetro y provocar errores de indicación. Si no puede modificarse el proceso, la solución es utilizar manómetros con glicerina.

El calor puede anular el funcionamiento del microprocesador de un instrumento digital.

Se ha dicho antes que el valor verdadero de un mensurando es una cantidad intrínsecamente desconocida, pues sólo podría determinarse mediante una medición perfecta, sin errores. El valor verdadero convencional es el valor que se atribuye al mensurando, incluyendo la magnitud de la incertidumbre asociada.

Un *patrón* es un elemento cuyo valor verdadero convencional es aceptado. De esta manera, al medir repetidas veces con el patrón el instrumento en cuestión, la diferencia entre el promedio de los diferentes resultados y el valor verdadero convencional permite corregir los resultados de las mediciones efectuadas con el instrumento, mientras que la desviación típica del conjunto de resultados, o un múltiplo aceptado de ella, constituye la incertidumbre.

Esta es otra manera de considerar el proceso de calibración, definiéndolo como el conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores indicados por un instrumento y el correspondiente valor del mensurando, materializado en un patrón utilizado como referencia.

Como el error absoluto es imposible de conocer, se utiliza el error absoluto convencional que es el hallado a través de un muestreo estadístico de un gran número de mediciones, y que se adopta como valor verdadero convencional:

$$\text{Error absoluto convencional} = \text{Valor medido} - \text{Valor verdadero convencional}$$

El error relativo, que permite comparar los resultados de las mediciones efectuadas, es:

$$\text{Error relativo} = \frac{\text{Error absoluto convencional}}{\text{Valor verdadero convencional}} = \frac{\text{Valor medido} - \text{Valor verdadero convencional}}{\text{Valor verdadero convencional}}$$

Por ejemplo, supongamos que queremos determinar el error de un manómetro digital a un valor de la presión de 5 bar (500 kPa), que se considera el valor verdadero convencional.

El manómetro es conectado a otro manómetro patrón de más calidad y se efectúan 5 lecturas de las que se calcula su media, resultando ser 5,1 bar (510 kPa).

Utilizando el valor verdadero convencional de 5 bar (500 kPa), el error es:

$$5,1 - 5 = +0,1 \text{ bar (10 kPa)}$$

$$\text{Error relativo de la lectura} = \frac{5,1 - 5}{5,1} = \frac{+0,1}{5,1} = 0,0196 = 1,96\%$$

El *error aleatorio* de la medida se produce por causa de variaciones impredecibles en una o más variables de influencia. Por ejemplo, al determinar el nivel de un producto mediante un transmisor de flotador, las variaciones de temperatura van a modificar la densidad del producto y por tanto el nivel de flotación y por consiguiente, la lectura del instrumento de nivel. No es posible compensar estas variaciones, pero sí cuantificarlas a base de repetir las lecturas un número determinado de veces en las que muy probablemente coincidirán todas las variaciones de densidad del producto.

El error aleatorio es el resultado de una medición menos el valor medio que resultaría de un número infinito de medidas del mismo mensurando, realizadas en condiciones de repetibilidad. Como no es posible realizar un número infinito de medidas, solo es posible determinar un estimado del error aleatorio.

$$\text{Error aleatorio} = \text{error} - \text{error sistemático}$$

El *error sistemático* es el valor medio que resultaría de un número infinito de medidas del mismo mensurando que se llevan a cabo en las mismas condiciones de repetibilidad menos el valor del mensurando.

Se presenta debido a la influencia constante de una variable. Por ejemplo, la medición, mediante un voltímetro de impedancia finita, de una tensión a través de una resistencia, da lugar a un error sistemático, que puede corregirse si se conoce la impedancia del voltímetro y el valor de la resistencia.

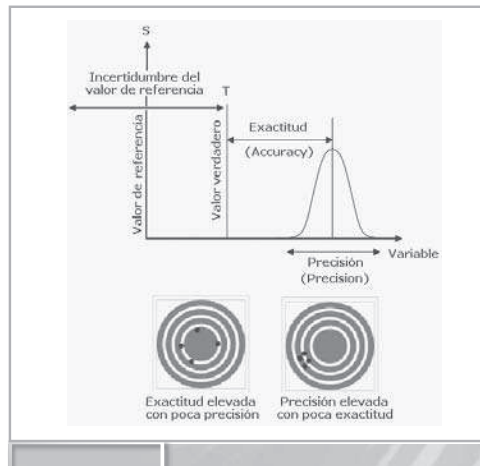
Aquí conviene señalar que los instrumentos de medida del proceso se calibran mediante aparatos patrón que permiten eliminar los errores sistemáticos. Sin embargo, la incertidumbre de los aparatos patrón acompaña los procedimientos de calibración que se llevan a cabo, por lo que la conclusión es que es difícil eliminar completamente los errores sistemáticos.

Para compensar el error sistemático puede emplearse un factor de corrección, que es el valor numérico que multiplica al resultado sin corregir de una medida.

#### 1.2.5 Exactitud (accuracy)

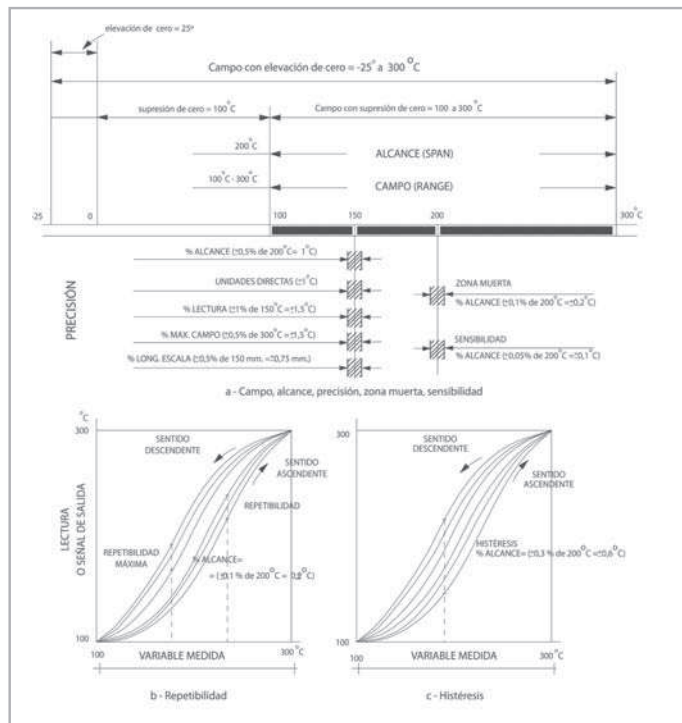
La *exactitud (accuracy)* de una medida es el grado de aproximación al valor verdadero. En otras palabras, es la cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida.

La *exactitud (accuracy)* tal como la considera el fabricante del instrumento, define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio durante un período de tiempo determinado (normalmente 1 año).



**Figura 1.4** Exactitud y precisión.

La exactitud se da en términos de inexactitud, es decir, un instrumento de temperatura de 0 – 100 °C con temperatura del proceso de 100 °C y que marca 99,98 °C se aproxima al valor real en 0,02 °C, o sea, tiene una inexactitud de 0,02 °C. Hay varias formas de expresar la exactitud:



**Figura 1.5** Definiciones de los instrumentos.

- a. Tanto por ciento del alcance, campo de medida o *range*. Ejemplo: en el instrumento de temperatura de la figura 1.5, para una lectura de 150 °C y una exactitud de  $\pm 0,5\%$ , el valor real de la temperatura estará comprendido entre  $150 \pm 0,5 \times 200/100 = 150 \pm 1$ , es decir, entre 149 y 151 °C.
- b. Directamente, en unidades de la variable medida. Ejemplo: exactitud  $\pm 1$  °C.
- c. Tanto por ciento de la lectura efectuada. Ejemplo: exactitud de  $\pm 1\%$  de 150 °C, es decir,  $\pm 1,5$  °C.
- d. Tanto por ciento del valor máximo del campo de medida. Ejemplo: exactitud de  $\pm 0,5\%$  de 300 °C =  $\pm 1,5$  °C.
- e. Tanto por ciento de la longitud de la escala. Ejemplo: si la longitud de la escala del instrumento de la figura 1.5 es 150 mm, la exactitud de  $+ 0,5\%$  representará  $+ 0,75$  mm en la escala.

La exactitud varía en cada punto del campo de medida, si bien el fabricante la especifica en todo el margen del instrumento indicando a veces su valor en algunas zonas de la escala. Por ejemplo: un manómetro puede tener una exactitud de  $+ 1\%$  en toda la escala y de  $+ 0,5\%$  en la zona central. Cuando se desea obtener la máxima exactitud del instrumento en un punto determinado de la escala, puede calibrarse únicamente para este punto de trabajo, sin considerar los valores restantes del campo de medida. Por ejemplo: un termómetro de 0-150 °C y de  $+ 1\%$  de exactitud situado en un baño de temperatura constante a 80 °C, puede ser calibrado a este valor, de modo que su exactitud en este punto de trabajo será la máxima que se pueda obtener con un termómetro patrón. Es obvio que para los valores restantes, en particular los correspondientes a los extremos de la escala, la exactitud se apartará de  $+ 1\%$ .

Hay que señalar que los valores de la exactitud de un instrumento se consideran en general establecidos para el usuario, es decir, son los proporcionados por los fabricantes de los instrumentos. Sin embargo, estos últimos suelen considerar también los valores de calibración en fábrica y de inspección. Por ejemplo, a un instrumento que en fábrica tiene una exactitud de calibración de  $\pm 0,8\%$ , en inspección le corresponde  $\pm 0,9\%$  y la dada al usuario es  $+ 1\%$ .

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

### 1.2.6 Precisión

La *precisión* de una medida es el grado de dispersión del resultado de la medida cuando esta se repite un número determinado de veces bajo condiciones especificadas.

En otras palabras, la precisión es la cualidad de un instrumento por la que tiende a dar lecturas muy próximas unas a otras, es decir, es el grado de dispersión de las mismas.

Un instrumento puede tener una pobre exactitud pero al tiempo una gran precisión (figura 1.4). Por ejemplo, un manómetro de intervalo de medida de 0 a 10 bar puede

tener un error de cero considerable marcando 2 bar sin presión en el proceso y diversas lecturas de 7,049, 7,05, 7,051, 7,052 efectuadas a lo largo del tiempo y en las mismas condiciones de servicio, para una presión del proceso de 5 bar. Tendrá un error práctico de 2 bar, pero los valores leídos estarán muy próximos entre sí con una muy pequeña dispersión máxima de  $7,052 - 7,049 = 0,003$ , es decir, el instrumento tendrá una gran precisión.

Por tanto, los instrumentos de medida estarán diseñados por los fabricantes para que sean precisos, y como periódicamente se descalibran, deben reajustarse para que sean exactos.

Se debe señalar que el término *precisión* se asocia en ocasiones a la repetibilidad, resolución o exactitud, por lo que es preferible utilizar estos últimos términos y evitar el uso de *precisión* para evitar confusiones.

### 1.2.7 Incertidumbre de la medida (*uncertainty*)

#### 1.2.7.1 Generalidades

Cuando se realiza una operación de calibración, se compara el instrumento a calibrar con un aparato patrón para averiguar si el error (diferencia entre el valor leído por el instrumento y el verdadero valor medido con el aparato patrón) se encuentra dentro de los límites dados por el fabricante del instrumento. Como el aparato patrón no permite medir exactamente el valor verdadero (también tiene un error) y como además en la operación de comparación intervienen diversas fuentes de error, no es posible caracterizar la medida por un único valor, lo que da lugar a la llamada incertidumbre de la medida o *incertidumbre* (*uncertainty*).

Así pues, la incertidumbre es un parámetro asociado al resultado de una medida que caracteriza la dispersión de los valores que pueden atribuirse razonablemente al mensurando, es decir, a la variable particular sujeta a la medida (nivel, temperatura, ...)

O bien, la incertidumbre es un parámetro que caracteriza el intervalo dentro del cual se cree con gran seguridad que se encuentra el valor verdadero del mensurando.

Esta dispersión es un campo de valores de los resultados de las medidas y la llamada “incertidumbre de la medida” es un estimado de la magnitud del campo expresada con un nivel de confianza determinado. El nivel de confianza es normalmente de 95% y puede expresarse en unidades SI (mm, °C, MPa, bar, ...)

Por ejemplo, la medida de una densidad es de 5,1 mg/litro con una incertidumbre de  $\pm 0,2$  mg/litro para un nivel de confianza de 95%.

¿Qué significado tiene esta descripción? Existe la probabilidad de 95% de que el valor verdadero de la densidad se encuentre dentro del intervalo de 4,9 a 5,3 mg/litro, es decir, existe 1 posibilidad entre 20 (5%) de que el valor verdadero de la densidad esté fuera del campo (4,9 – 5,3).

#### Formas de expresar la incertidumbre:

La incertidumbre se expresa con 2 cifras significativas (*Guide for the Expression of the Uncertainty of Measurement - GUM*) en colaboración con la Organización Internacional de Normalización (ISO), y el Centro Español de Metrología (CEM). Podemos definir

el concepto de cifra significativa como aquella que aporta información no ambigua ni superflua acerca de una determinada medida experimental. Esta definición nos conduce a las siguientes reglas de cómputo de cifras significativas:

1. Todas las cifras diferentes de cero que expresen cantidades iguales o superiores a la incertidumbre experimental son significativas (4123 tiene 4 cifras; 0.4123 tiene 4 cifras).
2. Los ceros únicamente son significativos cuando se encuentran entre dos cifras diferentes de cero. (203 tiene 3 cifras; 230 tiene 2 cifras).
3. Los ceros a la izquierda de una cifra diferente de cero no son significativos ya que únicamente indican la posición de la coma decimal y pueden ser anulados mediante un cambio de unidades (0.0023 m tiene 2 cifras ; 2,3 mm tiene 2 cifras).
4. Los ceros a la derecha de cifras no nulas pueden o no ser significativos, dependiendo de la incertidumbre experimental (0,023000 g tiene 2 cifras si apreciamos el mg; y 5 cifras si apreciamos el  $\mu\text{g}$ ; 230 tiene 2 cifras; 230 tiene 3 cifras; 230,0 tiene 4 cifras).

En general, la mejor manera de calcular el número de cifras significativas es expresar el número en notación científica y practicar el recuento sobre el factor multiplicativo de la potencia de diez correspondiente. Ejemplo, 0,023000 con incertidumbre de  $\text{mg} = 2.3 \cdot 10^{-2} \text{ g}$  tiene 2 cifras; 0,023000 con incertidumbre de  $\mu\text{g} = 2,3000 \cdot 10^{-2}$  tiene 5 cifras.

En cualquier caso, antes de proceder a la fijación de las cifras significativas de una cantidad resultado de una medición, debe conocerse su incertidumbre que determinará de manera decisiva este hecho.

#### Ejemplo:

Supongamos que obtenemos para el valor de una determinada masa el valor 5,000673 g con una incertidumbre 28  $\mu\text{g}$ . Como la incertidumbre ha de expresarse con dos cifras significativas, el resultado de la medida es:  $m = (5\ 000\ 673 \pm 28) \mu\text{g}$ .

Por lo que la cantidad asignada como valor estimado tiene en este caso 7 cifras significativas.

**Redondeada la incertidumbre**, el resultado de la medición debe tener las mismas posiciones decimales que su incertidumbre.

#### Ejemplo:

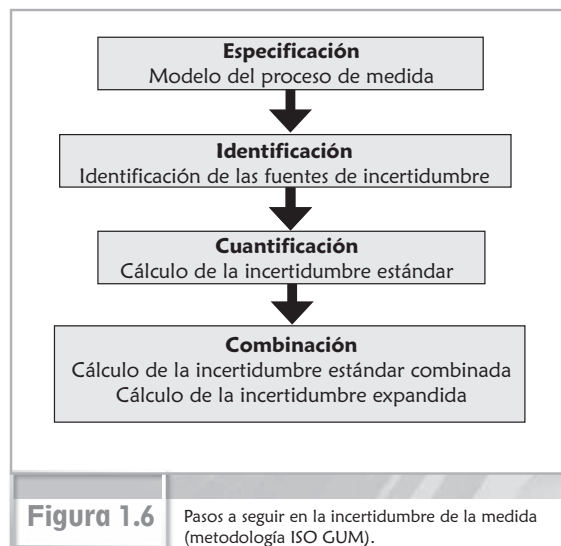
Un instrumento de caudal de un fluido indicó Caudal = 12,3208 l/min con una incertidumbre  $u = 0,03428 \text{ l/min}$ .

Redondeando la incertidumbre a 2 dígitos significativos se tiene:  $u = 0,034 \text{ l/min}$ . El caudal debe tener las mismas 3 cifras decimales del redondeo de la incertidumbre, es decir, caudal = 12,321 l/min.

El resultado final es Caudal = 12,321 l/min  $\pm 0,034 \text{ l/min}$ , lo que significa que el caudal real estará, con un alto grado de probabilidad, dentro del intervalo:

$$12,321 - 0,034 = 12,287 \text{ l/min} \quad \text{a} \quad 12,321 + 0,034 = 12,355 \text{ l/min}$$

La incertidumbre de una medida tiene por origen la combinación de un número de parámetros de influencia (componentes de la incertidumbre), tales como efectos térmicos y errores del instrumento. La influencia de cada componente en la incertidumbre debe cuantificarse y expresarse numéricamente como una desviación estándar. Estos valores numéricos se combinan de acuerdo con las reglas de la propagación de incertidumbre para generar una desviación estándar combinada ( $u_c$ ) para cada punto. Como la probabilidad de esta incertidumbre puntual es de 68,27%, este valor es claramente insuficiente por lo que se amplía a 95,45% multiplicando por un factor de cobertura  $k = 2$  para producir una incertidumbre expandida ( $k * u_c$ ) con un nivel de confianza determinado (figura 1.6).



Por tanto, para una cierta cantidad medida, el resultado de la medición es:

$$y - k * u_c \leq Y \leq y + k * u_c$$

Este entorno acotado alrededor del valor  $Y$  se define como intervalo de confianza de una distribución normal y viene determinado por la fracción  $p$  de la probabilidad asociada al factor de cobertura  $k$  (ver tabla 1.1). Por ejemplo, si  $k = 2.58$ , se tiene un nivel de confianza de 99%. Y si  $k = 1,96$ , el nivel de confianza es de 95%. Para  $k = 2$ , la probabilidad asociada es de 95,45%.

#### Ejemplo:

Se dispone un peso de 10 Kg en una báscula y se repite varias veces la pesada. Las indicaciones van a variar ligeramente de manera aleatoria, siguiendo una curva de distribución normal y para una desviación ( $\sigma$ ), la incertidumbre estándar, que suponemos de valor 2,5 g, tendrá una probabilidad de 68,27%, es decir, la incertidumbre real estará entre 1,8 g y 3,2 g.

Distribución normal	
Factor de cobertura (k)	Nivel de confianza o probabilidad (%)
0.675	50
1	68.27
1.439	85
1.645	90
1.732	91.68
1.960	95
2	95.45
2.327	98
2.576	99
3	99.73

Tabla 1.1

Valor de k según el nivel de confianza (distribución normal).

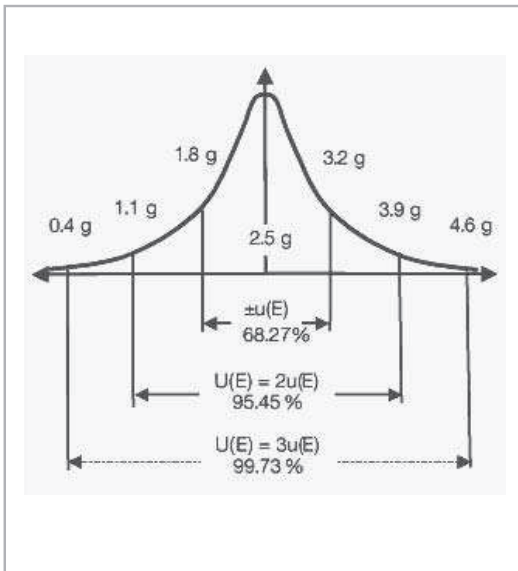


Figura 1.7

Valor de k según el nivel de confianza (distribución normal).

En la práctica, la probabilidad de 68,27% es claramente insuficiente ya que significa que en 1 medición de 3 realizadas ( 31,73%), el error será mayor que la incertidumbre

especificada. Por tanto, se amplía (o extiende) al nivel de confianza (o de probabilidad) de 95,45% multiplicando por un factor de cobertura de 2. De este modo habrá solo 1 medición de cada 20 ( 5%) en la que el error será mayor que la incertidumbre especificada.

Así pues, el error será de 2,5 g y la incertidumbre expandida es de:

$$(3,9 - 1,1) = 2,8 \text{ gramos} = \pm 1,4 \text{ gramos}$$

Lo cual significa que el error de la indicación es de 2,5 g y el error actual, con un nivel de confianza (o una probabilidad) de 95,45%, se encuentra entre 1,1 g y 3,9 g.

Si las mediciones que se realizan son escasas, pueden validarse las conclusiones estadísticas mediante la *distribución t de Student* y en este caso, el factor de *cobertura k* se sustituye por la *constante t*.

Y así, en la tabla 1.2 para 20 mediciones con un nivel de confianza de 95%, se tiene un t de Student de 2.093 que difiere del factor de cobertura  $k = 1.96$  para ese mismo nivel de confianza.

Coeficiente t de Student				
Número de mediciones	Nivel de confianza			
	90%	95%	99%	99.5%
2	6.314	12.706	63.657	127.320
3	2.920	4.303	9.925	14.089
4	2.353	3.182	5.841	7.453
5	2.132	2.770	4.604	5.598
6	2.015	2.571	4.032	4.773
7	1.943	2.447	3.707	4.317
8	1.895	2.365	3.499	4.029
9	1.860	2.306	3.355	3.833
10	1.833	2.262	3.250	3.690
11	1.812	2.228	3.169	3.581
12	1.796	2.201	3.106	3.497
13	1.782	2.179	3.055	3.428
14	1.771	2.160	3.012	3.372
15	1.761	2.145	2.977	3.326
16	1.753	2.131	2.947	3.286
17	1.746	2.120	2.921	3.252
18	1.740	2.110	2.898	3.222
19	1.734	2.101	2.878	3.197
20	1.729	2.093	2.861	3.174

**Tabla 1.2**

Coeficiente t de Student.

La norma ISO/IEC 17025:1999 de calibraciones de laboratorio analiza la incertidumbre y trata temas como la competencia técnica y conducta ética del personal, la utilización de ensayos bien definidos y procedimientos de calibración, la participación en ensayos de pericia y el contenido de los informes de ensayos y los certificados. Estas incertidumbres deben estar soportadas matemáticamente y están representadas como incertidumbres expandidas usando un nivel de confianza de aproximadamente 95% y su factor de cobertura correspondiente, a menos que el laboratorio pueda demostrar otro nivel de confianza.

### 1.2.7.2 Ejemplos prácticos de determinación de la incertidumbre

#### Proceso de calibración de un transmisor de presión digital con 3 valores independientes

Se considerarán solo 3 valores con objeto de simplificar los cálculos y hacerlos más comprensibles al lector.

La incertidumbre típica es un estimador de la desviación típica (desviación estándar) de la variable aleatoria que representa los valores que puede asumir el resultado de una medición.

Dependiendo de la forma en que se calculan, existen dos tipos de incertidumbre típica, la incertidumbre típica tipo A determinada estadísticamente, y la incertidumbre típica tipo B, calculada por otros medios.

#### Evaluación de la incertidumbre tipo A

Se efectúa por análisis estadístico de la serie de observaciones repetidas, considerando que la distribución de probabilidades de las medias de dichas variables es la curva de Gauss o de distribución normal en forma de campana. De este modo, la media aritmética es el valor estimado de la variable, mientras que la desviación estándar representa el grado de dispersión de los valores de la variable que se miden repetitivamente.

La media, que sirve como estimador de la variable considerada, es:

$$\text{Media muestral: } x = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k$$

Los valores medidos han sido:      10,001              10,099              10,098

La media de la muestra es:       $x = \bar{X} = \frac{1}{3} * (10,001 + 10,099 + 10,098) = 0,066$

La varianza de la muestra, que es una aproximación a la incertidumbre asociada al proceso de calibración, es:

$$\sigma^2(X) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{X})^2$$

$$\sigma^2(X) = \frac{1}{3-1} [(0,001 - 0,066)^2 + (0,099 - 0,066)^2 + (0,098 - 0,066)^2] = 0,003169$$

La varianza experimental de la media:

$$\sigma^2(\bar{X}) = \frac{\sigma^2(X)}{n} \quad \text{Y su valor:} \quad \sigma^2(\bar{X}) = \frac{0,003169}{3} = 0,001056$$

La desviación típica experimental de la media es la raíz cuadrada positiva de la varianza experimental de la media y corresponde por definición a la incertidumbre típica tipo A.

$$u(x) = \sigma(\bar{X}) = \frac{\sigma(X)}{\sqrt{n}} \quad \text{y su valor es:} \quad u(x) = \sigma(\bar{X}) = \sqrt{\frac{0,001056}{3}} = \pm 0,01876$$

La incertidumbre expandida  $U$  permite expresar la incertidumbre en forma de intervalo dentro del cual existe una alta probabilidad de acertar. Para ello, se multiplica la incertidumbre típica  $u$  por un número  $k$  llamado factor de cobertura, obteniéndose la llamada incertidumbre expandida:  $U = u \cdot k$

Los valores de  $k$ , factor de cobertura, dependen de la distribución de los valores medidos, de la probabilidad asociada y de otros factores. Si suponemos que los valores presentan una distribución normal, la tabla 1.1 muestra algunos valores de dicho factor. Puede verse que los valores de  $U = u_c$ ,  $U = 2 \cdot u_c$ ,  $U = 3 \cdot u_c$  definen intervalos de confianza de 68,27%, 95,45% y 99,73%, respectivamente. El intervalo de confianza de 95% significa que existe la probabilidad de que en 1 medición de 20 realizadas (5%), el error sea mayor que la incertidumbre especificada.

El valor normal que se considera es  $k = 1,96$  para un nivel de confianza de 95% con una incertidumbre expandida de:

$$U = k \cdot u = 1,96 \cdot 0,01876 = \pm 0,0367696 = \pm 0,037 \text{ (2 cifras significativas)}$$

Cuando el número de datos es pequeño ( $n < 25$ ), tal como ocurre en el ejemplo, se utiliza la distribución de Student que es una aproximación a la distribución normal y el factor de cobertura  $k$  se sustituye por la letra  $t$  como coeficiente de Student.

En la tabla 1.2 se pueden observar los valores de la constante  $t$  correspondientes al coeficiente de Student para diferentes números de mediciones y niveles de confianza. En el ejemplo, que corresponde a 3 valores de la variable y considerando un nivel de confianza de 95%, se tiene un  $t$  de Student de 4,303 que difiere del factor de cobertura para ese mismo nivel de confianza ( $k = 1,96$ ). Luego:

$$U = k \cdot u = 4,303 \cdot 0,01876 = \pm 0,08072428 = \pm 0,081 \text{ (2 cifras significativas)}$$

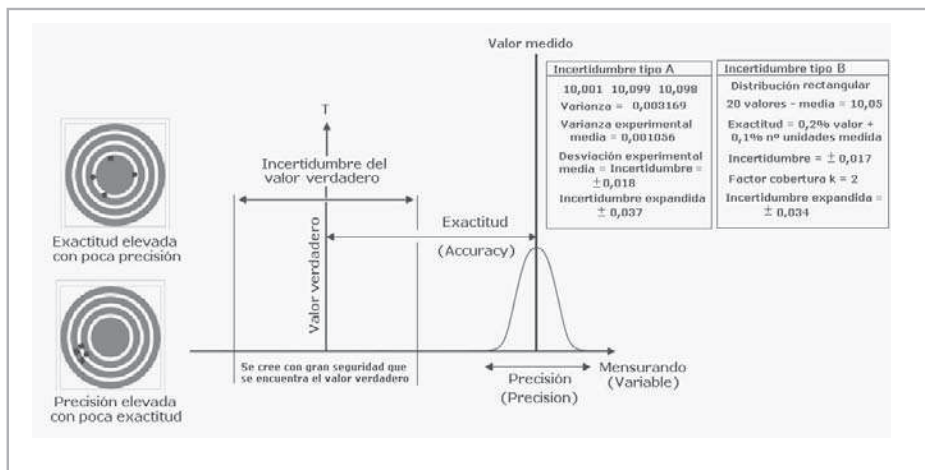
Esta es la incertidumbre tipo A obtenida con medios estadísticos.

#### Calibración de un transmisor de presión digital con 10 valores independientes

La desviación estándar es:  $u(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (X_i - \bar{X})^2}$  Y la incertidumbre expandida  $U = k \cdot u_c$ . Consideramos  $k = 2$ .

Señal de salida de un transmisor de presión digital								
Nº señal	Valor presión (bar)	Media aritmética	Valor absoluto diferencias con la media aritmética	Cuadrado valores anteriores y suma	1/(n-1)	Sigma = Desviación estándar de la media (raíz cuadrada(E13*F 13))	Incertidumbre (sigma/raiz(n))	Incertidumbre expandida con factor K (2)= 2 * incertidumbre
1	10,00005	10,000051	1E-06	1E-12				
2	10,00008	10,000051	2,9E-05	8,41E-10				
3	10,00003	10,000051	2,1E-05	4,41E-10				
4	10,00004	10,000051	1,1E-05	1,21E-10				
5	10,00005	10,000051	1E-06	1E-12				
6	10,00006	10,000051	9E-06	8,1E-11				
7	10,00008	10,000051	2,9E-05	8,41E-10				
8	10,00005	10,000051	1E-06	1E-12				
9	10,00004	10,000051	1,1E-05	1,21E-10				
10	10,00003	10,000051	2,1E-05	4,41E-10				
Suma	100,00051			2,89E-09	0,111111	1,79196E-05	5,66667E-06	1,1333E-05
Nº señales y media aritmética	10	10,000051						

**Tabla 1.3** Incertidumbre tipo A (transmisor de presión digital – 10 lecturas).



**Figura 1.8** Incertidumbres tipos A y B en la calibración de un instrumento.

### Evaluación de la incertidumbre tipo B

Cuando no se dispone de una serie repetida de mediciones, o cuando el método de medición es muy difícil, no es posible calcular la incertidumbre tipo A. En estos casos se puede calcular la incertidumbre tipo B, que se basa en otros supuestos pero que es igualmente válida.

El uso apropiado de la información disponible para una evaluación tipo B de la incertidumbre típica de la medición exige un juicio basado en la experiencia y en conocimientos generales. Es una destreza que puede adquirirse con la práctica. Una evaluación tipo B de la incertidumbre típica que tenga una base sólida puede ser tan fiable como una evaluación tipo A, especialmente cuando ésta se basa sólo en un número comparativamente pequeño de observaciones estadísticamente independientes. Un ejemplo de incertidumbre tipo B es el referente a un patrón calibrado por un laboratorio de referencia (tipo A, por métodos estadísticos) que es usado por otro laboratorio que considera la incertidumbre certificada por el primer laboratorio como un dato.

En la práctica, pueden existir muchas fuentes de incertidumbre en una medición:

- A. definición incompleta del mensurando.
- B. realización imperfecta de la definición del mensurando.
- C. muestreo no representativo.
- D. efectos no adecuadamente conocidos de las condiciones ambientales o mediciones imperfectas de las mismas (coeficientes de dilatación, derivas térmicas, índice de refracción, presiones barométricas).
- E. desviaciones personales en la lectura de instrumentos analógicos.
- F. límites en la discriminación o resolución del instrumento.
- G. valores inexactos de los patrones y materiales de referencia utilizados en la medición (deformaciones y contactos relajados en la medición).
- H. valores inexactos de constantes y otros parámetros obtenidos de fuentes externas y utilizadas en el algoritmo para la obtención de datos.
- I. aproximaciones e hipótesis incorporadas en el método y el procedimiento de medición.
- J. variaciones en observaciones repetidas del mensurando realizadas en condiciones aparentemente idénticas.

Los medios utilizados en la evaluación de la incertidumbre son:

- Incertidumbre asociada con el instrumento (estabilidad del instrumento).
- Incertidumbre por deriva del instrumento con el tiempo (idealmente se realizan 2 calibraciones al año y se estiman las incertidumbres).
- Incertidumbres asociadas con el proceso de medida (otros métodos de calibración, efectos relacionados con el operador, efectos de muestreo y medios de transferencia tales como inestabilidad del baño de calibración en temperatura).
- Incertidumbre de la calibración. En los informes de calibración se consulta la incertidumbre y el error del manómetro, así como el factor de cobertura.
- Incertidumbre por factores ambientales (temperatura, presión y humedad) del laboratorio.
- Límites en la discriminación o resolución del instrumento (distribución normal, rectangular y triangular).
- Desviaciones personales en la lectura de instrumentos analógicos.

- Valores inexactos de los patrones y materiales de referencia utilizados en la medición.
- Valores inexactos de constantes y otros parámetros obtenidos de fuentes externas y utilizadas en el algoritmo para la obtención de datos.
- Aproximaciones e hipótesis incorporadas en el método y el procedimiento de medición.
- Variaciones en observaciones repetidas del mensurando realizadas en condiciones aparentemente idénticas.

Para realizar un ensayo, el procedimiento general es que el patrón de medida tenga una exactitud suficientemente mayor que la del aparato que se calibra (traceado de presión ISA S 37.3). Se suelen utilizar patrones de exactitud 4:1 con relación a la exactitud del instrumento que van a medir.

Para ello se puede suponer una cierta distribución de probabilidad bajo la cual se encuentra el valor verdadero, tal como la distribución normal o la distribución rectangular o triangular.

#### Distribución normal

##### **Incertidumbre obtenida de una fuente exterior (desviación estándar).**

En la especificación de un fabricante, en un certificado de calibración, en un manual se indica un múltiple de la desviación estándar con relación a la incertidumbre estándar. Se divide pues el valor de la incertidumbre por el multiplicador.

##### **Incertidumbre obtenida de una fuente exterior (intervalo de confianza)**

En la especificación de un fabricante, en un certificado de calibración, en un manual se indica un intervalo de confianza, tal como 95% o 99%, a una incertidumbre estándar, tratando la incertidumbre indicada como si se hubiera utilizado una distribución normal (a menos que se indique otra cosa) y dividiéndola por el factor apropiado para esta distribución. Estos factores son 1,96 y 2,576 para los dos niveles de confianza indicados.

##### **Incertidumbre obtenida de una distribución asumida**

Distribución normal con 1 posibilidad sobre 2 (50%) de que el valor de la cantidad esté entre  $a_-$  y  $a_+$ . Luego  $a = (a_+ + a_-)/2$  se encuentra en la mitad del ancho del intervalo y la incertidumbre es:  $uj \cong 1,48 \cdot a$ .

Distribución normal con 2 posibilidades sobre 3 (67%) de que el valor de la cantidad esté entre  $a_-$  y  $a_+$ . Luego  $a = (a_+ + a_-)/2$  se encuentra en la mitad del ancho del intervalo y la incertidumbre es  $uj \cong a$ .

Distribución normal con 3 desviaciones estándar que corresponde a 99,73 límites. Por tanto, la media de estos límites es:  $(a_+ + a_-)/2$  y contiene casi todos los valores posibles de la cantidad, es decir, 99,73% de todos ellos. Luego,  $(a_+ + a_-)/2$  es la mitad del ancho del intervalo y la incertidumbre es  $uj \cong a/3$ .

#### Distribución uniforme rectangular

La distribución rectangular se usa cuando se tiene la razonable certeza de que el valor verdadero se encuentra en cierto intervalo, con probabilidad uno. Si la probabilidad decrece hacia los extremos del intervalo es más apropiada una distribución triangular.



En los manómetros analógicos la resolución es una fracción del intervalo más pequeño marcado en la escala. Esta fracción  $f$  es un número comprendido entre 4 y 10 y es seleccionado por el operador, teniendo en cuenta la propia escala y el tamaño del índice. En muchos manómetros  $f = 4$  y la resolución es  $1/4$  de la mínima división de la escala (5 kPa en la figura 1.9). La incertidumbre sería:

$$u = \frac{5}{\sqrt{3}} = \pm 2,88 \text{ kPa}$$

Considerando el factor de cobertura fiable  $k = 2$  que asegura 95% de nivel de confianza, se tiene la incertidumbre expandida:

$$U = 2 * 2,88 = \pm 5,76 \text{ kPa} = \pm 0,0576 \text{ bar}$$

En los manómetros digitales la resolución corresponde normalmente al dígito menos significativo (0,01 kPa en la figura 1.9). Luego la incertidumbre es:

$$u = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = \pm 0,0058 \text{ kPa}$$

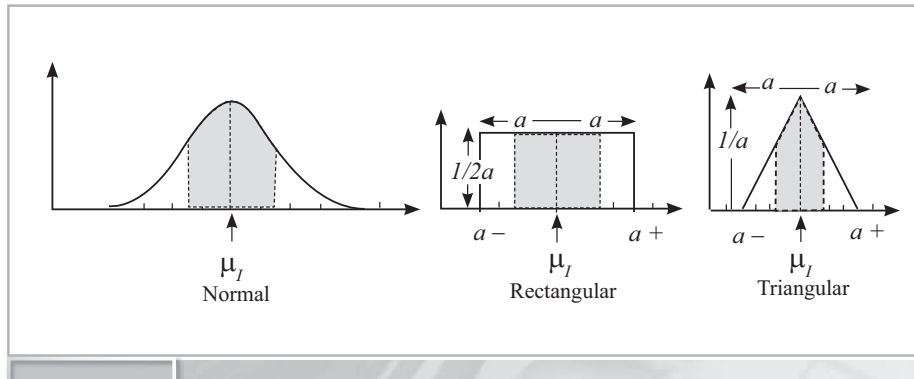
Y con  $k = 2$ , se tiene la incertidumbre expandida:

$$U = 2 * 0,0058 = \pm 0,0116 \text{ kPa} = \pm 0,116 \text{ mb}$$

#### Distribución triangular

Se estiman los límites inferior y superior  $a_-$  y  $a_+$ , para el valor de la cantidad de entrada. Luego el mejor estimado del valor de la cantidad es  $a = (a_+ + a_-)/2$  con:

$$u = \frac{a}{\sqrt{6}} = \frac{a_+ + a_-}{2\sqrt{6}}$$



**Figura 1.10** Distribuciones normal, rectangular y triangular.

La resolución de un instrumento se considera normalmente con distribución rectangular, por tanto la incertidumbre por resolución se estima de acuerdo con la siguiente relación:

#### Otros ejemplos

Si se estiman los límites inferior y superior  $a_-$  y  $a_+$ , el mejor estimado del valor de la cantidad es  $a = (a_+ + a_-)/2$  con la incertidumbre:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{a_+ + a_-}{2\sqrt{3}}$$

#### Ejemplo:

Sea 10,51 el mejor valor estimado de una presión y se establece que los valores posibles experimentales límites inferior y superior son respectivamente 10,3 y 10,8. Las diferencias con relación al estimado de 10,51 son respectivamente de 0,21 y 0,29. Suponiendo una distribución rectangular, la incertidumbre estándar es:

$$u_b(X_i) = \frac{a_+ + a_-}{2} * \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{0,2 + 0,2}{2} * \frac{1}{\sqrt{3}} = \pm 0,144$$

Cuando se dispone de una sola medida se toma su valor como valor estimado de la variable, y como valor de la incertidumbre, la incertidumbre típica asociada.

#### Ejemplo:

Un instrumento ha realizado medidas repetidas de 20 valores nominales de la presión y la media aritmética de estas medidas es 10,05 unidades. El fabricante del instrumento

indica en su manual que la exactitud del instrumento es  $\pm 0,2\%$  del valor medido +  $0,1\%$  del número de unidades de medida (intervalo de la medida = 10 unidades).

Suponiendo una distribución rectangular de probabilidades en los límites del intervalo, la incertidumbre estándar asociada con la cantidad medida es:

$$u_B = (0,002 * 0,0 + 0,001 * 0) * \frac{1}{\sqrt{3}} = \pm 0,01738$$

Es decir, la cantidad es 10,05, y la incertidumbre expandida debida al instrumento de medida, con  $k = 2$ , es  $0,01738 * 2 = \pm 0,03476$ .

En el caso de una distribución rectangular con un intervalo de ancho  $2a$  la incertidumbre típica tipo B está dada por:

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}} = 0,577 * a$$

#### Ejemplo

Si suponemos  $a = 0,0017 \text{ bar} = 0,17 \text{ kPa}$  resulta:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} = 0,577 * 0,17 = 0,098 \cong 0,1 \text{ kPa} = 0,001 \text{ bar}$$

**Instrumento analógico.** La incertidumbre de resolución ( $u_r$ ) es:

$$u_r = \frac{R \text{ solución}}{\sqrt{2}} = \frac{1/4 (\text{Mínima división de la escala})}{\sqrt{12}} = \frac{1/4 (0,5 \text{ kPa})}{\sqrt{2}} = 0,036 \text{ kPa} = \pm 0,00036 \text{ bar}$$

Considerando el factor de cobertura fiable  $k = 2$  que asegura 95% de nivel de confianza, se tiene la incertidumbre expandida:

$$U = 2 * 0,036 = \pm 0,072 \text{ kPa} = \pm 0,00072 \text{ bar}$$

**Instrumento digital.** El error límite de un instrumento digital, indicado por la mayoría de fabricantes según la norma IEC 485 es:

$$Ex = \pm (p\% * X_m + m * \text{dígitos})$$

Siendo:

$p$  = porcentaje de valor medido

$m$  = cantidad de dígitos de los menos significativos para la escala seleccionada.

#### Ejemplo

Se mide un voltaje de 17,80 V cc en un multímetro digital en la escala de 19,99 V c.c. La hoja de datos provista por el fabricante indica:  $Ex = \pm (0,1\% * U_m + 1 * \text{dígitos})$ .

$$Ex = \pm (0,1\% * U_m + 1 * \text{dígitos}) = \pm (0,1\% * 17,80 + 1 * 0,01 \text{ V cc}) = \pm 0,0278 \text{ V c.c.}$$

y el resultado de la medición será,  $V = (17,80 \pm 0,03) \text{ V c.c.}$

La incertidumbre de resolución ( $u_r$ ) debida a la división de escala puede considerarse una distribución uniforme (típico de instrumentos digitales).

$$\text{Si llamamos "E" a la división de escala } u_E^2 = \frac{1}{3} \left( \frac{E}{2} \right)^2 = \frac{E^2}{12}$$

#### Ejemplo

Indicador digital de temperatura  $E = 0.01 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$u_E^2 = \frac{1}{3} \left( \frac{E}{2} \right)^2 = \frac{0,01^2}{12} \approx \pm 0,00083 \text{ } ^\circ\text{C}^2$$

Y la incertidumbre expandida es:  $U = 2 * 0,00083 = \pm 0,00166 \text{ } ^\circ\text{C}$

Cuando intervienen varios factores de incertidumbre se procede del modo siguiente:

**Incertidumbre de resolución ( $u_r$ ).** Ya comentada para los instrumentos analógicos o digitales. Para el caso en que el dígito menos significativo sea 0,3.

$$u = \frac{R \text{ solución}}{\sqrt{2}} = \frac{\text{Dígito menos significativo}}{\sqrt{2}} = \frac{0,3}{\sqrt{2}} = 0,212 \text{ kPa} \approx \pm 0,2 \text{ kPa} = \pm 0,002 \text{ bar}$$

**Incertidumbre del patrón ( $u_i$ )** obtenida por medio de un informe o certificado de calibración. Se reduce a incertidumbre estándar, expresada generalmente con un factor de cobertura  $k$ :

**Incertidumbre tipo A ( $u_A$ )** obtenida de la repetición de las mediciones de acuerdo con

$$u_A = (\text{Mediciones repetidas tipo A}) = \frac{\sigma (\text{desviación estándar mediciones repetidas})}{\sqrt{n(\text{no de repeticiones})}}$$

La incertidumbre combinada se obtiene de la siguiente relación:

$$u_c = \sqrt{u_r^2 + u_i^2 + u_A^2} = \sqrt{0,1^2 + 0,1^2 + 0,1^2} = \pm 0,1732 \text{ kPa} = \pm 0,001732 \text{ bar}$$

Valor obtenido suponiendo que cada incertidumbre tiene el mismo valor de  $\pm 0,1 \text{ kPa}$  ( $0,001 \text{ bar}$ ).

La incertidumbre expandida de la medición expresada con un factor de cobertura,  $k = 2$ .

$$U_e = k * u_c = \pm 2 * 0,1732 = \pm 0,3464 \text{ kPa} = \pm 0,003464 \text{ bar}$$

El coeficiente de sensibilidad es la relación matemática entre un parámetro de influencia y su efecto en el resultado de la medida. Por ejemplo, en un manómetro clásico un error en el mecanismo final de conversión de la deformación del tubo *Bourdon* (desgaste por vibraciones) tendrá un efecto similar en la lectura de la presión

en la escala, es decir, el coeficiente de sensibilidad será la unidad. En cambio, en una barra metálica de un transmisor de equilibrio de fuerzas la temperatura influirá de tal manera que el coeficiente de sensibilidad será igual al coeficiente de expansión lineal del metal de la barra multiplicado por la longitud de la barra. Normalmente el coeficiente de sensibilidad se considera la unidad.

En la tabla 1.4 se resumen los cálculos efectuados.

Incertidumbre tipo B					
Datos: Manómetro - resolución 0,1 kPa. Incertidumbre del manómetro (certificado de calibración) ± 0,2 kPa (k=2). Repetibilidad (Desviación estándar de la media) = 0,1 kPa					
Nº	Fuente	Distribución	Incertidumbre estándar (kPa)	Coficiente de sensibilidad	Contribución%
1	resolución	rectangular	0,1	1	33
2	calibración (k=1)	normal	0,1	1	33
3	repetibilidad	normal	0,1	1	33
1 kPa = 0,01 bar 1 bar = 100 kPa			Coficiente de cobertura k	Incertidumbre estándar combinada	0,17
			2	Incertidumbre expandida	0,34

**Tabla 1.4** Incertidumbre tipo B.

Los fabricantes de software de calibración emplean la expresión:

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{k}{k_p}\right)^2 * u_p^2 + k^2 w^2 * \left(\frac{S_c^2}{n_c} + \frac{S_m^2}{n}\right) + \left(\frac{k}{3}\right)^2 D\bar{X}^2 c + \dots}$$

- Con: k = factor de cobertura utilizado en el proceso de calibración
- Kp = factor de cobertura del patrón
- Up = incertidumbre típica del patrón
- Sc = desviación típica debida a las distintas correcciones
- Sm = desviación típica debida a las reiteraciones
- w = factor que depende del número de reiteraciones de una medida (nc)

"w" es un factor que depende del número de reiteraciones de una medida (nc) "k" es									
nc	2	3	4	5	6	7	8	9	10
c	7	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1

**Tabla 1.5** Factor w en función del número de reiteraciones de una medida.

La norma ISO 31-0:1992 indica el procedimiento de redondeo.

La incertidumbre  $U$  debe darse con 2 cifras decimales como máximo (se suele redondear a división de escala o a  $E/2$ ). Por ejemplo: un criterio suele ser redondear a  $E$  cuando sea “calibración para uso”, y a  $E/2$  cuando sea “calibración para laboratorio”.

El criterio de Chauvenet indica la forma de rechazar aquellas medidas que se alejan de la media una cantidad dada por la constante de Chauvenet.

En la realización práctica, una vez calculada la media  $X_c$  y la desviación típica ( $S_c$ ) de una serie de medidas, han de rechazarse aquellas cuya desviación a la media sea mayor que  $K_c * S_c$ . El intervalo de valores admitidos es:

$$[x_c - k_c(n_c)s_c, X_c + k_c(n_c)s_c]$$

n	Kc	n	Kc
2	1,15	15	2,13
3	1,38	20	2,24
4	1,54	25	2,33
5	1,65	30	2,4
6	1,73	40	2,48
7	1,8	50	2,57
8	1,86	100	2,81
9	1,92	300	3,14
10	1,96	500	3,29
		1000	3,48

**Tabla 1.6** Constante de Chauvenet – criterio para rechazo de medidas.

Por ejemplo, en 5 medidas de temperatura se ha encontrado una media de 50,045 °C con una desviación típica de 0,05 °C. Aplicando la tabla 1.6, se tiene que la constante de Chauvenet es  $K_c = 1,65$ . Luego:  $K_c * S_c = 1,65 * 0,05 = 0,0825$ .

Y el intervalo de valores admitidos es:  $x - 0,0825$  a  $x + 0,0825$

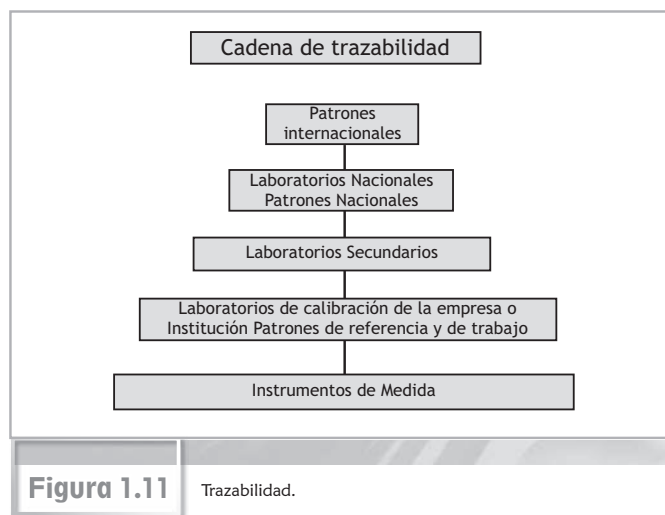
### 1.2.8 Trazabilidad (*traceability*)

Propiedad del resultado de las mediciones efectuadas con un instrumento o con un patrón, tal que puede relacionarse con patrones nacionales o internacionales, a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones, todas ellas con incertidumbres determinadas en cada comparación. Cada paso en la cadena debe documentarse en un informe de calibración o de ensayo.

#### Otra definición:

Propiedad de un resultado de medición que nos permite relacionar ese resultado con el respectivo patrón internacional de la magnitud que se está midiendo. La única forma en que pueden compararse los resultados obtenidos por diferentes sistemas de medición en diferentes lugares del mundo es asegurando su trazabilidad, es decir, que

ambos estén referidos al patrón internacional. Como se ve, este es uno de los atributos indispensables para garantizar la confiabilidad de cualquier resultado de medición.



Para mantener la trazabilidad es esencial que los instrumentos de medida y patrones se sometan, periódicamente, a la operación de calibración, enfrentándolos a otros de valor e incertidumbre conocidos y que normalmente poseen mejores características metrológicas.

La acreditación es el reconocimiento, por parte de un organismo oficial de acreditación, de la competencia de un laboratorio para calibrar, ensayar o medir un producto o un instrumento. Los laboratorios acreditados son los únicos que tienen autoridad para realizar calibraciones trazables. (*ISO Guide 25 Requirements for Technical competence of Calibration and testing laboratories*).

En España, la entidad de acreditación reconocida es la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), que como miembro de la European Cooperation for Accreditation (EA) tiene reconocimiento internacional.

La ENAC acredita a todas las entidades que evalúan la conformidad a través de:

- Ensayos
- Calibraciones
- Certificaciones de productos, sistemas de calidad, sistemas de gestión medioambiental y personas.
- Verificaciones medioambientales

Documentos importantes:

SCI -Sistema de Calibración Industrial

VIM -Vocabulario Internacional de términos básicos y generales en Metrología

GUM -Guía para la expresión de la Incertidumbre (Uncertainty) de las medidas

Los Laboratorios acreditados garantizan a los compradores, a los usuarios y a los consumidores, que la calidad y la seguridad de sus ensayos y servicios es evaluada por organismos competentes y perfectamente cualificados. Deben tener suficiente personal con un nivel de entrenamiento, educación y conocimiento técnico y experiencia suficientes para el trabajo que tienen asignado.

### 1.2.9 Zona muerta (*dead zone o dead band*)

La zona muerta (*dead zone o dead band*) es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento, es decir, que no produce su respuesta. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida. Por ejemplo: en el instrumento de la figura 1.5 es de  $\pm 0,1\%$ , es decir, de  $0,1 \times 200/100 = \pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

### 1.2.10 Sensibilidad (*sensitivity*)

La sensibilidad (*sensitivity*) es la razón entre el incremento de la señal de salida o de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona, después de haberse alcanzado el estado de reposo. Por ejemplo, si en un transmisor electrónico de 0-10 bar la presión pasa de 5 a 5,5 bar y la señal de salida de 11,9 a 12,3 mA c.c., la sensibilidad es el cociente:

$$\frac{(12,3 - 11,9)/(20 - 4)}{(5,5 - 5)/10} = \pm 0,5 \text{ mA c.c./bar}$$

Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida. Si la sensibilidad del instrumento de temperatura de la figura 1.6 es  $+ 0,05\%$ , su valor será  $0,05 \times 200/100 = + 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

### 1.2.11 Repetibilidad (*repeatability*)

La repetibilidad (*repeatability*) es la capacidad de reproducción de las mediciones sucesivas de un mensurando (variable detectada por posiciones de la pluma o del índice o de la señal de salida del instrumento), al medir repetidamente valores idénticos del mensurando en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación, recorriendo todo el campo.

La expresión de la repetibilidad en condiciones controladas de calibración es:

$$\text{Error repetibilidad (\%)} = \frac{2 * S_x}{r_o} * 100$$

La repetibilidad puede expresarse cuantitativamente en función de las características de dispersión de los resultados. Para determinarla, el fabricante comprueba la diferencia entre el valor verdadero de la variable y la indicación o señal de salida del instrumento recorriendo todo el campo, y partiendo, para cada determinación, desde el valor mínimo del campo de medida. De este modo, en el caso de un manómetro puede haber anotado los siguientes datos relacionados.

Ensayo de repetibilidad de un manómetro				
Variable	Presión	Indicación	Sx (Diferencia)	(2*Sx/Escala)*100
Desde 0 a 0,5	0,5	0,502	0,002	0,04
Desde 0 a 1	1	1,006	0,006	0,12
Desde 0 a 1,5	1,5	1,509	0,009	0,18
Desde 0 a 2	2	2,008	0,008	0,16
Desde 0 a 2,5	2,5	2,506	0,006	0,12
Desde 0 a 3	3	3,007	0,007	0,14
Desde 0 a 3,5	3,5	3,503	0,003	0,06
Desde 0 a 4	4	4,006	0,006	0,12
Desde 0 a 4,5	4,5	4,507	0,007	0,14
Desde 0 a 5	5	5,01	0,01	0,2
Desde 0 a 5,5	5,5	5,505	0,005	0,1
Desde 0 a 6	6	6,006	0,006	0,12
Desde 0 a 6,5	6,5	6,501	0,001	0,02
Desde 0 a 7	7	7,003	0,003	0,06
Desde 0 a 7,5	7,5	7,504	0,004	0,08
Desde 0 a 8	8	8,009	0,009	0,18
Desde 0 a 8,5	8,5	8,508	0,008	0,16
Desde 0 a 9	9	9,008	0,008	0,16
Desde 0 a 9,5	9,5	9,505	0,005	0,1
Desde 0 a 10	10	10,005	0,005	0,1
<b>Repetibilidad máxima (%)</b>				<b>0,2</b>

**Tabla 1.7** Ensayo de repetibilidad de un manómetro.

Las condiciones de repetibilidad incluyen:

1. el mismo procedimiento de medida.
2. el mismo instrumentista.
3. el mismo instrumento de medida trabajando en las mismas condiciones.
4. el mismo lugar.
5. repetición de la medida dentro de un corto periodo de tiempo.

Se considera en general su valor máximo (repetibilidad máxima) y se expresa en tanto por ciento del alcance; un valor representativo es el de  $\pm 0,1\%$ .

La repetibilidad puede expresarse cuantitativamente en función de las características de dispersión de los resultados.

### 1.2.12 Histéresis (*hysteresis*)

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

Se expresa en tanto por ciento del alcance de la medida. Por ejemplo, si en un termómetro de 0-100 °C, para el valor de la variable de 40 °C la aguja marca 39,9 al subir la temperatura desde 0, e indica 40,1 al bajar la temperatura desde 100 °C, el valor de la histéresis es:

$$\frac{40,1 - 39,9}{100 - 0} \cdot 100 = \pm 0,2\%$$

En la figura 1.5 pueden verse las curvas de histéresis, que están dibujadas exageradamente para apreciar bien su forma.

### 1.2.13 Linealidad

La aproximación de una curva de calibración a una línea recta especificada. Se expresa en forma de desviación máxima con relación a una línea recta que pasa a través de los puntos dados correspondientes a 0% y a 100% de la variable medida.

Por ejemplo, en la medición de caudal con una placa-orificio, la presión diferencial a través del orificio de la placa varía según la raíz cuadrada del caudal.

$$Q = k \sqrt{\text{Presión diferencial}}$$

Para calcular la linealidad sería necesario colocar un instrumento extractor de raíz cuadrada de la presión diferencial, con lo cual ya podría representarse su relación.

En cambio, si que es lineal la relación entre el caudal y la posición del flotador en un rotámetro.

### 1.2.14 Otros términos

En las especificaciones de los instrumentos se emplean otros términos como los siguientes:

#### Campo de medida con elevación de cero

Es aquel campo de medida en que el valor cero de la variable o señal medida es mayor que el valor inferior del campo. Por ejemplo, - 10 ° a 30 °C.

#### Campo de medida con supresión de cero

Es aquel campo de medida en que el valor cero de la variable o señal medida es menor que el valor inferior del campo. Por ejemplo, 20 ° a 60 °C.

#### Elevación de cero

Es la cantidad con que el valor cero de la variable supera el valor inferior del campo. Puede expresarse en unidades de la variable medida o en% del alcance. Por ejemplo, 10 °C en el campo - 10 ° a 30 °C del instrumento, o sea  $(10/40) \cdot 100 = 25\%$ .

### Supresión de cero

Es la cantidad con que el valor inferior del campo supera el valor cero de la variable. Puede expresarse en unidades de la variable medida o en% del alcance. Por ejemplo, 20 °C en el campo 20 ° a 60 °C del instrumento, o sea  $(20/40)*100 = 50\%$ .

### Deriva

Es una variación en la señal de salida que se presenta en un período de tiempo determinado mientras se mantienen constantes la variable medida y todas las condiciones ambientales. Se suelen considerar la *deriva de cero* (variación en la señal de salida para el valor cero de la medida atribuible a cualquier causa interna) y la deriva térmica de cero (variación en la señal de salida a medida cero, debida a los efectos únicos de la temperatura). La deriva está expresada usualmente en porcentaje de la señal de salida de la escala total a la temperatura ambiente, por unidad, o por intervalo de variación de la temperatura. Por ejemplo, la deriva térmica de cero de un instrumento en condiciones de temperatura ambiente durante 1 mes fue 0,2% del alcance.

### Fiabilidad (*Reliability*)

Medida de la probabilidad de que un instrumento continúe comportándose dentro de límites especificados de error a lo largo de un tiempo determinado y bajo condiciones especificadas.

### Resolución

Magnitud de los cambios en escalón de la señal de salida (expresados en tanto por ciento de la salida de toda la escala) al ir variando continuamente la medida en todo el campo. Es también el grado con que el instrumento puede discriminar valores equivalentes de una cantidad, o la menor diferencia de valor que el aparato puede distinguir.

En un instrumento analógico es el cambio más pequeño que un operador calificado puede detectar. En un instrumento digital es el valor del dígito menos significativo.

### Resolución infinita

Capacidad de proporcionar una señal de salida progresiva y continua en todo el campo de trabajo del instrumento.

### Ruido

Cualquier perturbación eléctrica o señal accidental no deseada que modifica la transmisión, indicación o registro de los datos deseados. Un caso especial es la interferencia de radiotransmisores RFI (Radio Frequency Interference). Puede expresarse en unidades de la señal de salida o en tanto por ciento del alcance.

### Temperatura de servicio

Campo de temperaturas en el cual se espera que trabaje el instrumento dentro de límites de error especificados.

### Vida útil de servicio

Tiempo mínimo especificado durante el cual se aplican las características de servicio continuo e intermitente del instrumento sin que se presenten cambios en su comportamiento más allá de tolerancias especificadas.

### Reproductibilidad (*Reproducibility*)

Capacidad de reproducción de un instrumento de las medidas repetitivas de la lectura o señal de salida para el mismo valor de la variable medida alcanzado en ambos sentidos, en las mismas condiciones de servicio y a lo largo de un período de tiempo determinado. Por ejemplo, un valor representativo sería  $\pm 0,2\%$  del alcance de la lectura o señal de salida a lo largo de un período de 30 días.

### Respuesta frecuencial

Variación con la frecuencia de la relación de amplitudes señal de salida/variable medida (y de la diferencia de fases entre la salida y la variable medida) para una medida de variación senoidal aplicada a un instrumento dentro de un campo establecido de frecuencias de la variable medida. Se especifica usualmente como «dentro de + ...% de ... a ... Hz».

## 1.3 Calibración de un instrumento

### 1.3.1 Generalidades

Todo instrumento tiene asociada una incertidumbre propia de su estado. Para proceder a calibrarlo es necesario contar con un patrón de calibración (elemento de referencia) con un intervalo de medida cercano al que se quiere medir. El patrón a su vez tiene asociada una incertidumbre propia de su fabricación.

La calibración puede realizarse de dos maneras:

1. En forma lo más exacta posible a base de efectuar mediciones con el patrón en forma reiterada. El número de repeticiones que asegura niveles de confianza razonables se encuentra entre 10 y 20. El método se sigue siempre en los laboratorios acreditados y opcionalmente en los procesos industriales, cuando interesa una calibración muy exacta de un instrumento por necesidades puntuales del proceso.
2. En forma simplificada con un método de calibración simple y la confirmación con mediciones en puntos concretos de la escala, típicamente 0%, 25%, 50%, 75% y 100%. El método es típico de los procesos industriales.

En el primer método, una vez efectuadas las mediciones es posible definir la media, la varianza muestral y la incertidumbre de las mediciones de calibración.

Cuando se puede atribuir una distribución normal (gausiana) al mensurando y la incertidumbre típica asociada a la estimación de salida tiene la suficiente fiabilidad, debe utilizarse el factor de cobertura usual  $k = 2$  que se utiliza comúnmente para aproximar la incertidumbre expandida asociada a un nivel de confianza o probabilidad de 95%.

El intervalo de confianza de 95% significa que existe la probabilidad de que en una medición de 20 realizadas ( 5%), el error sea mayor que la incertidumbre especificada.

Estas condiciones se cumplen en la mayoría de los casos encontrados en los trabajos de calibración.

Otros valores posibles son  $U = u_c$ ,  $U = 2 \cdot u_c$ ,  $U = 3 \cdot u_c$ , que definen intervalos de confianza de 68,27%, 95,45% y 99,73%, respectivamente.

Asimismo, es posible también definir el estimador  $c$  de corrección (asociado al error sistemático), como:  $c = x - x_{rc}$

Los aparatos patrón tienen conocido el valor de la incertidumbre. Por ejemplo:

- Un barómetro patrón con sensor de presión de cuarzo tiene una incertidumbre de  $\pm (0,01\% \text{ FS} + 0,005\% \text{ de la lectura})$ .
- Un equipo de peso muerto hidráulico tiene una incertidumbre estándar de 0,015% de la lectura.

El valor estimado del error de un instrumento del que se conocen sus errores de histéresis ( $e_h$ ), de linealidad ( $e_L$ ), de sensibilidad ( $e_k$ ), y de repetibilidad ( $e_R$ ), es:

$$e_{\text{instrumento}} = \pm \sqrt{e_h^2 + e_L^2 + e_k^2 + e_R^2} = \pm \sqrt{0,2^2 + 0,1^2 + 0,1^2 + 0,2^2} = \pm 0,3$$

Cuando se realiza una medición con la participación de varios instrumentos, colocados unos a continuación de otros, la incertidumbre resultante es la raíz cuadrada de la suma algebraica de los cuadrados de las incertidumbres de las medidas de cada instrumento, es decir, es la expresión:

$$\pm \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + \dots}$$

Por ejemplo, la incertidumbre al medir un caudal con un diafragma, un transmisor electrónico de 4-20 mA c.c., un receptor y un integrador electrónicos es:

Elementos del lazo	Incertidumbre (%)	Cuadrado Incertidumbre	Incertidumbre total	Incertidumbre total (%)
Diafragma	2	0,000400		
Transmisor electrónico 4-20 mA c.c.	0,5	0,000025		
Receptor electrónico	0,5	0,000025		
Integrador electrónico	0,5	0,000025		
Suma cuadrados incertidumbres		0,000475	0,021794495	<b>2,18</b>

**Tabla 1.8**

Incertidumbre de una cadena de instrumentos de medición de caudal.

### 1.3.2 Expresión de la incertidumbre de medida en los certificados de calibración

En los certificados de calibración, el resultado completo de la medición, que consiste en el estimado y del mensurando y la incertidumbre expandida asociada  $U$  debe

expresarse en la forma  $(y \pm U)$ . También debe incluirse una nota explicativa que, en el caso general, debería tener el siguiente contenido:

“La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medición por el factor de cobertura  $k=2$  que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente 95%. La incertidumbre típica de medida se ha determinado conforme al documento EAL-R2.”

Sin embargo, cuando se ha utilizado la distribución  $t$  de Student, la nota debería decir lo siguiente:

“La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medida por el factor de cobertura  $k = XX$  que, para una distribución  $t$  de Student con  $\nu = YY$  grados efectivos de libertad, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente 95%. La incertidumbre típica de medición se ha determinado conforme al documento EAL-R2.”

El valor numérico de la incertidumbre de medida debe expresarse, como máximo, con dos cifras significativas. En general, el valor numérico del resultado de la medición debe redondearse en su expresión final a la menor cifra significativa en el valor de la incertidumbre expandida asignada al resultado de la medición. Para el proceso de redondeo, deben aplicarse las normas habituales para el redondeo de cifras (para conocer más detalles, véase el documento ISO 31-0:1992, Anexo B). Sin embargo, si el redondeo reduce el valor numérico de la incertidumbre de medición en más de 5%, debe utilizarse el valor redondeado hacia arriba.

La guía ISO 25 recomienda que se anoten en una hoja los procedimientos de uso, registro y comprobación de calibraciones, registro de reparación y mantenimiento y, lo más importante, las restricciones de uso del instrumento en lugares aprobados. Esto asegura:

1. demostrar a través de comprobaciones y calibraciones adecuadas que el instrumento es estable y
2. demostrar que el instrumento no se ha expuesto a condiciones o usos que pueden afectar adversamente su rendimiento o comportamiento.

La recalibración se requiere tan pronto como no exista confianza en los resultados porque no se es capaz de demostrar que las medidas son traceables. Se recomienda que se recalibre:

1. Al comprarlo.
2. Después de un año de servicio (depende de su uso) y para confirmar su estabilidad.
3. Necesariamente al cabo de 5 años de servicio.

### 1.3.3 Certificado de calibración

En la tabla pueden verse los motivos de la información requerida en un certificado de calibración.

Información requerida en un certificado de calibración	
Información	Motivo
Título: Certificado de calibración	Lógico. El documento debe decir lo que contiene
Nombre y dirección del laboratorio	Contacto para información ulterior
Nº de identificación del certificado	De este modo, puede seguirse el trabajo relativo a la calibración del instrumento.
Cada página debe estar numerada y figurar el nº total de páginas	Así se sabe que la información es completa
Identificación inequívoca del instrumento, marca, modelo, nº de serie y nº de versión del software	Así se sabe que el informe es el correcto y que el instrumento está completo.
Fecha de calibración	Así se sabe la actualidad de los resultados de la calibración
Identificación del método de calibración empleado o descripción unívoca del método no estándar utilizado y/o variaciones con relación a los métodos estándar	¿Cómo se obtuvieron los resultados? ¿Cómo se relacionan las medidas realizadas? Es una información muy útil que debe leerse cuidadosamente.
Condiciones bajo las que se lleva a cabo la calibración: temperatura ambiente, condiciones de carga y opciones del instrumento	Así se asegura la reproducción de las condiciones de calibración y que los resultados obtenidos son aplicables a la situación concreta en el proceso. Es una información muy útil que debe leerse cuidadosamente
Medidas realizadas y resultados obtenidos	Es el corazón del informe y refleja el coste del mismo
Incertidumbres estimadas de los resultados de la calibración	Esto permite calcular las incertidumbres en las medidas durante el proceso
Firma y título de la persona o personas que aceptan la responsabilidad del informe	Indica que el informe lleva la garantía del sistema de calidad del laboratorio
Debe establecerse que el certificado no puede reproducirse enteramente sin el consentimiento por escrito del laboratorio.	Asegura que la información relevante está siempre disponible para el usuario del certificado y que los datos usados en el certificado no pueden ser erróneos.
Acreditación del laboratorio	Asegura que el laboratorio es competente para proporcionar toda la información anterior.

**Tabla 1.9**

Información requerida en un certificado de calibración.

#### 1.3.4 Programas de cálculo de incertidumbres

Existen en el mercado programas de cálculo de incertidumbres:

- ProCalV5 Test Type Packages,
- SPC Software, Integrated Sciences Group, Hewlett Packard Corporate Metrology, Uncertainty Calculator 3.2 (ISO 'Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement', 1993, NIST Technical Note 1297, etc.),
- Tolerance Calculator 4.0, Fluke MET/CAL® Plus Versión 7.0, MET/CAL® V7.1 mejorado, Fluke MET/CAL® Plus Versión 7.2,

## 1.4 Ejemplos generales de características de instrumentos

En la figura 1.12 pueden verse tres tipos de instrumentos cuyas características son:

### Termómetro bimetálico:

Intervalo de medida (Range) = 0 – 100 °C Alcance (Span) = 100

Exactitud (Accuracy) =  $\pm 0,5\%$

Repetibilidad (Repeatability) =  $\pm 0,1\%$

Histéresis (Hysteresis) =  $\pm 0,2\%$

Incertidumbre (Uncertainty) =  $\pm 0,13\%$

### Transmisor de caudal digital multivariable por presión diferencial con compensación de presión y temperatura:

Intervalo de medida (Range) = 0 - 2,5 hasta 0 - 1000 mbar (0 - 1 hasta 0 - 400" c.d.a.)

Alcance (Span) de la presión diferencial = 2,5 a 1000 mbar / 1 a 400" c.d.a.

Alcance (Span) de la presión absoluta = 0,35 a 52 bar / 5 a 750 psia

Alcance (Span) de la presión relativa = 4,1 a 200 bar / 60 a 3.000 psig

Exactitud (Accuracy) de la presión diferencial =  $\pm 0,1\%$  del alcance

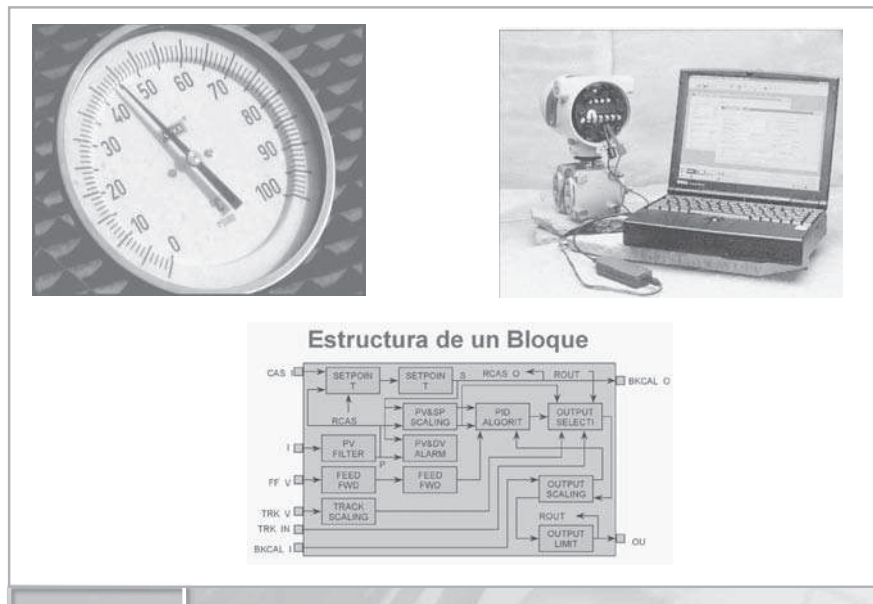
Exactitud (Accuracy) de la presión absoluta =  $\pm 0,1\%$  del alcance

Exactitud (Accuracy) de la temperatura =  $\pm 1\text{ °C} \pm 0,025\%$  del alcance

Limites de temperatura ambiente = -40 a 85 °C (-40 a 185 °F)

Alimentación = 85 a 260 V c.a.

Señal de salida = 20 mA c.c. o protocolo HART



**Figura 1.12**

Termómetro bimetálico, transmisor digital de caudal, bloque controlador Digital.

**Controlador digital universal:**

Entrada por termopar o sonda de resistencia

Exactitud (Accuracy) =  $\pm 0,25\%$  del alcance

Velocidad de muestreo (scan rate) = 6 veces/seg.

Resolución = cuatro veces mayor que la digital de la pantalla

Algoritmos de control = todo-nada, PID

Salida en señal continua lineal: 8 bits en 50 ms o 10 bits en 1 segundo

Salida por relé = 2A SPDT resistivo 240 VCA máximo. Más de 500.000 operaciones a la tensión/intensidad nominal

Nº de alarmas = 2

Limites de temperatura ambiente = 0 a 55 °C (32 a 131 °F), 20 a 95% H.R.

Alimentación = 120/240 V c.a. / 22 a 65 V c.c.

Comunicaciones = RS485 a 9600, 4800, 2400 o 1200 baudios (bits/seg)

## 1.5 Cómo se descalibran los instrumentos

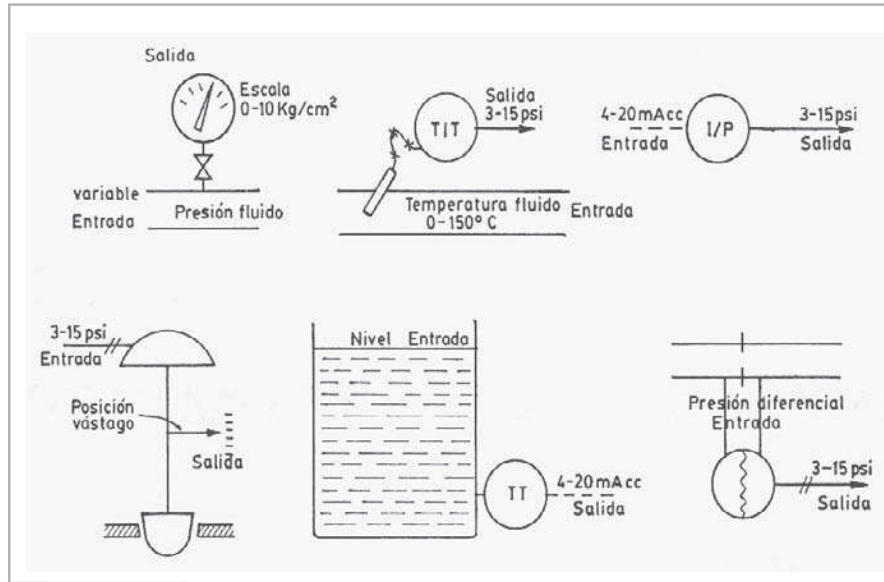
### 1.5.1 Generalidades

En la medida, transmisión, y control de las variables que intervienen en un proceso, existe una relación entre la variable de entrada y la de salida del instrumento. Por ejemplo: presión del proceso a lectura de presión de la escala en un manómetro; temperatura real a señal de salida electrónica en un transmisor electrónico de temperatura; señal digital de entrada a señal digital de salida en un controlador digital; señal de entrada neumática a posición del vástago del obturador en una válvula de control, etc.

Esta relación puede encontrarse también en las partes internas de un instrumento, en particular cuando este es complejo, por ejemplo en el caso de un controlador electrónico miniatura para montaje en panel, que está compuesto por varios bloques: unidad de punto de consigna, unidad de control, etc. En la unidad de punto de consigna existirá una relación entre la posición del botón de mando y la señal estándar que va al bloque controlador. En la unidad de control estarán ligadas la señal de error (diferencia entre el punto de consigna y la variable) y la señal de salida a la válvula de control, relación que será función de las acciones que posea el controlador.

Existirá una correspondencia entre la variable de entrada y la de salida (Fig. 1.12), representando esta última el valor de la variable de entrada.

En la práctica, los instrumentos de medición y control indican unos valores inexactos que se apartan en mayor o menor grado del valor real de la señal de entrada. El valor verdadero no se puede establecer, sólo sus límites que entran en los términos de la exactitud del instrumento. De este modo, un instrumento estará descalibrado si, al compararlo con otro instrumento patrón, la lectura se aparta del valor de la exactitud dado por el fabricante.

**Figura 1.13**

Relación salida-entrada en varios tipos de instrumentos.

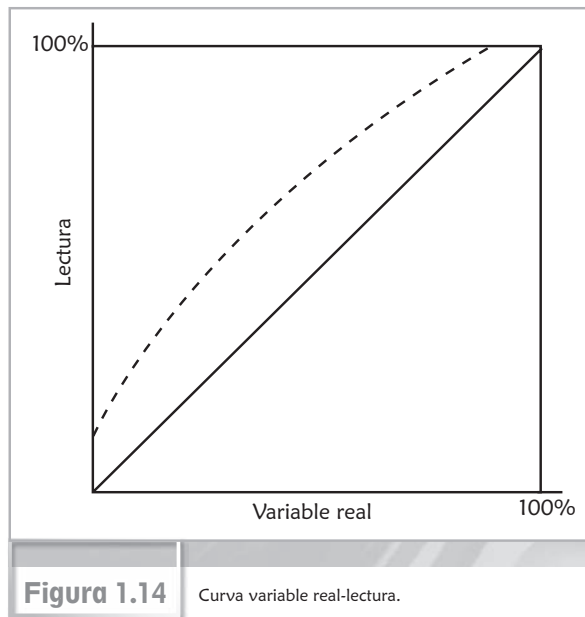
Si un instrumento recién salido de fábrica se instala en la industria y se olvida su existencia, poco a poco o rápidamente, dependiendo de las condiciones del proceso se irá descalibrando. Las causas pueden ser vibraciones, temperatura, golpes, deriva eléctrica, cambios en el proceso con variables fuera de los límites especificados, etc., de modo que será necesario establecer unos intervalos de calibración que vuelvan a poner al instrumento en las mismas o mejores condiciones que las iniciales.

### 1.5.2 Tipos de errores

En un instrumento ideal (sin error), la relación entre los valores reales de la variable comprendidos dentro del campo de medida y los valores de lectura del aparato es lineal.

Se considera que un instrumento está bien calibrado cuando en todos los puntos de su campo de medida la diferencia entre el valor real de la variable y el valor indicado, o registrado o transmitido, está comprendido entre los límites determinados por la exactitud del instrumento.

En condiciones de funcionamiento estático, las desviaciones de la curva variable real-lectura de un instrumento típico (fig. 1.13) con relación a la recta ideal representan los errores de medida. Esta curva puede descomponerse en tres que representan individualmente los tres tipos de errores que pueden hallarse en forma aislada o combinada.

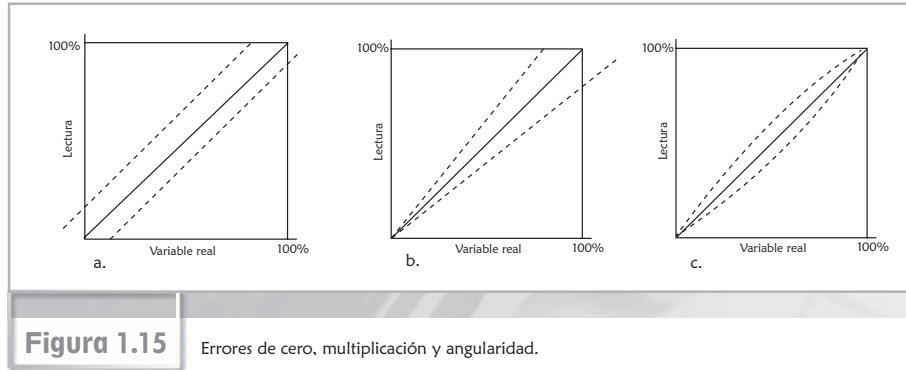


**Error de cero.** Todas las lecturas o señales de salida están desplazadas un mismo valor con relación a la recta ideal. Este tipo de error puede verse en la figura 1.15 (a), donde se observa que el desplazamiento puede ser positivo o negativo. Cambia el punto de partida o de base de la recta representativa sin que varíe la inclinación o la forma de la curva.

**Error de multiplicación.** Todas las lecturas o señales de salida aumentan o disminuyen progresivamente con relación a la recta representativa figura 1.15(b), sin que el punto de partida cambie. La desviación puede ser positiva o negativa.

**Error de angularidad.** La curva coincide con los puntos 0 y 100% de la recta representativa, pero se aparta de la misma en los restantes. En la figura 1.15(c) puede verse un error de este tipo. El máximo de la desviación suele estar a la mitad de la escala.

Los instrumentos pueden ajustarse para corregir estos errores, si bien hay que señalar que muchos instrumentos por su tipo de construcción no pueden tener el error de angularidad.



Otros errores provienen de la lectura del instrumento por el observador (instrumentos analógicos) y son:

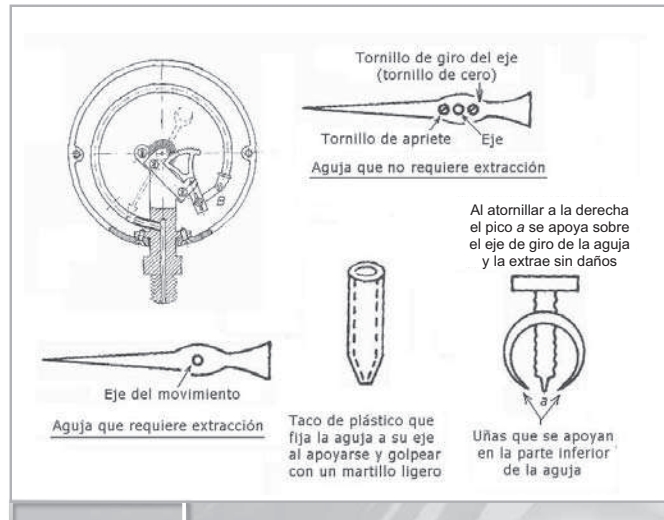
**Error de paralaje**, que se produce cuando el observador efectúa la lectura de modo que la línea de observación al índice no es perpendicular a la escala del instrumento. Para disminuirlo, algunos instrumentos tienen el sector graduado separado de la escala y a muy poca distancia del índice, y otros poseen un sector especular con lo que la línea de observación debe ser perpendicular a la escala para que coincidan el índice y su imagen.

**Error de interpolación**, que se presenta cuando el índice no coincide exactamente con la graduación de la escala, y el observador redondea sus lecturas por exceso o por defecto.

Evidentemente estos errores de paralaje y de interpolación no existen en los instrumentos de salida digital.

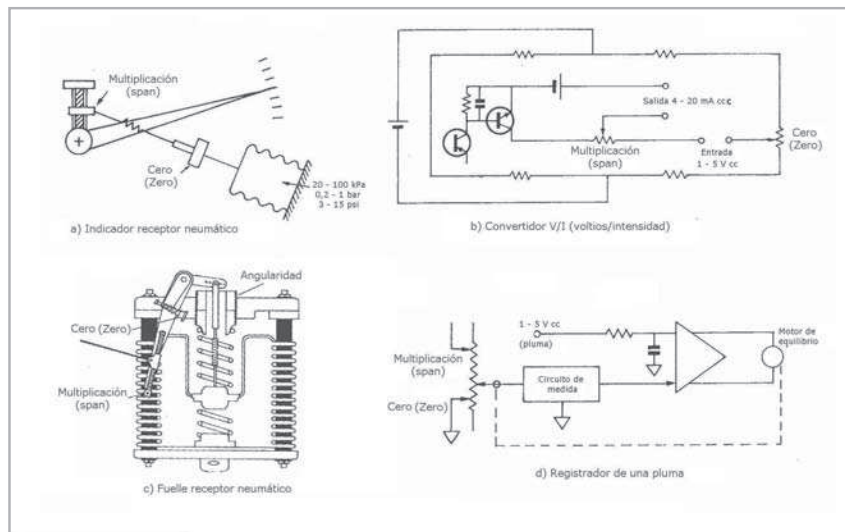
## 1.6 Método general de calibración

En general, el error de cero se corrige con el llamado tornillo de cero que modifica directamente la posición final del índice, la pluma o la señal de salida del instrumento. En la calibración de manómetros es necesario extraer la aguja para ajustar el cero, a no ser que el propio manómetro disponga de un engranaje con accionamiento exterior que modifique la posición de la aguja. Es una operación que se debe realizar cuidadosamente, so pena de dañar la aguja y los mecanismos del movimiento, de modo que es necesario emplear extractores.



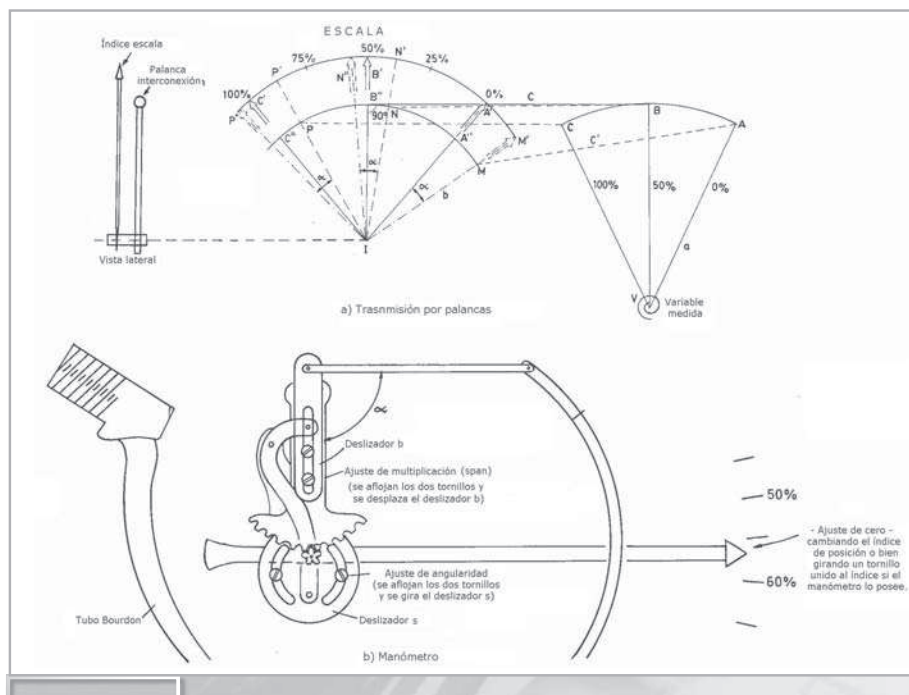
**Figura 1.16** Tornillo de cero de un manómetro.

El error de multiplicación se corrige actuando sobre el tornillo de multiplicación (o *span* en inglés) que modifica directamente la relación de amplitud de movimientos de la señal de salida (índice o pluma), es decir, que aumenta o disminuye progresivamente las lecturas sobre la escala.



**Figura 1.17** Tornillo de multiplicación (*span*).

El *error de angularidad* se presenta prácticamente sólo cuando el instrumento tiene una transmisión por palancas del movimiento del elemento primario o de la variable medida al índice de lectura o de registro. En los instrumentos electrónicos o digitales prácticamente no existe y, si se presenta, ello indica que el instrumento es defectuoso y hay que sustituirlo. El error de angularidad es nulo cuando las palancas quedan exactamente a escuadra con la variable a 50% de su valor. Se corrige, bien procediendo al escuadrado previo de las palancas o bien aumentando el error (unas cinco veces aproximadamente) en la misma dirección para alisar la curva de angularidad correspondiente.

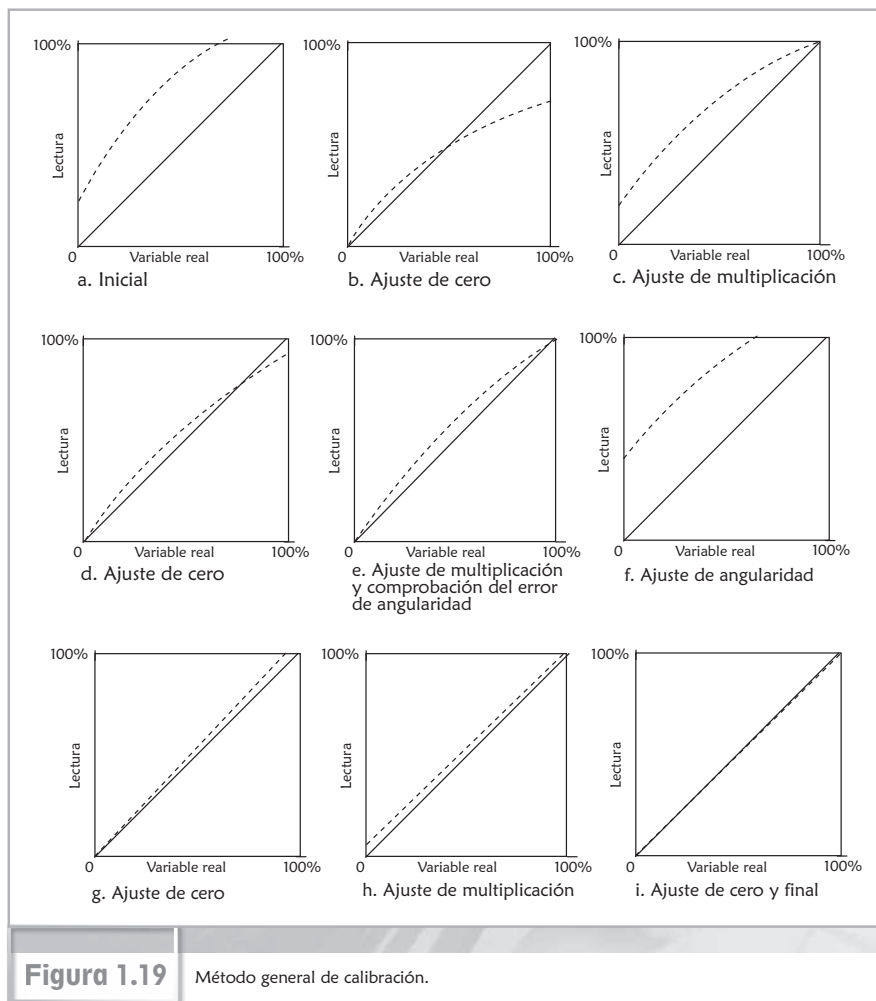


**Figura 1.18** Tornillo de angularidad de un manómetro.

Sentadas estas bases, el procedimiento general para calibrar un instrumento (fig. 1.18) es el siguiente:

1. Situar la variable en el valor mínimo del campo de medida, y en este valor ajustar el tornillo de cero del instrumento hasta que el índice señale el punto de base.
2. Situar la variable en el valor máximo del campo de medida, y en este valor ajustar el tornillo de multiplicación hasta que el índice señale el valor máximo de la variable.
3. Repetir los puntos anteriores 1 y 2 sucesivamente hasta que las lecturas sean correctas en sus valores máximo y mínimo (es decir, que estén comprendidas dentro de la exactitud del instrumento).

4. Si el instrumento tiene error de angularidad (sólo los mecánicos de transmisión por palancas), ajustar el tornillo de angularidad hasta mover el índice en la dirección del error unas cinco veces (la curva variable-lectura se aplanan).
5. Reajustar nuevamente los tornillos de cero y de multiplicación hasta conseguir la exactitud deseada o requerida.



6. Comprobar los puntos intermedios 25%, 50%, 75% de la calibración.

También se pueden realizar las comprobaciones a 10% y a 90% de la escala en vez de 0% a 100%, con el fin de disponer de más holgura en la calibración al principio y al final de la escala, particularmente en los instrumentos indicadores y registradores analógicos.

La posición de los tornillos de cero y multiplicación varía con el tipo de instrumento. Algunos carecen de alguno de ellos. Los instrumentos electrónicos no suelen poseer tornillo de angularidad.

En los instrumentos digitales inteligentes, los datos de calibración están almacenados en una EPROM y de este modo están corregidas con exactitud las no linealidades de los sensores para toda la vida útil del instrumento. Se encuentran grabados unos 126 puntos o más en vez de los cinco (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) que se consideran cuando se calibra un instrumento convencional. Un comunicador portátil con teclado alfanumérico permite comprobar desde el propio transmisor, o bien desde la consola de control, o bien desde cualquier punto de la línea de conexión (dos hilos), o bien a distancia por infrarrojos, el estado y calibración del transmisor. Estos instrumentos pueden ajustarse, enviando, a través del teclado alfanumérico del comunicador, el número de identificación del instrumento y los valores inferior y superior del campo de medida con los que se desea reajustar el aparato. Es decir, más que considerar la calibración de los instrumentos digitales se puede hablar de explorar el instrumento para configurarlo, planificar su mantenimiento preventivo, investigar las causas de posibles averías o registrar la configuración actual para un uso futuro. Esta información también se puede tratar desde un ordenador de bolsillo o desde un PC. En la tabla 1.10 se presentan los valores típicos de calibración de los instrumentos convencionales, siendo los más utilizados los subrayados y resaltados en negro.

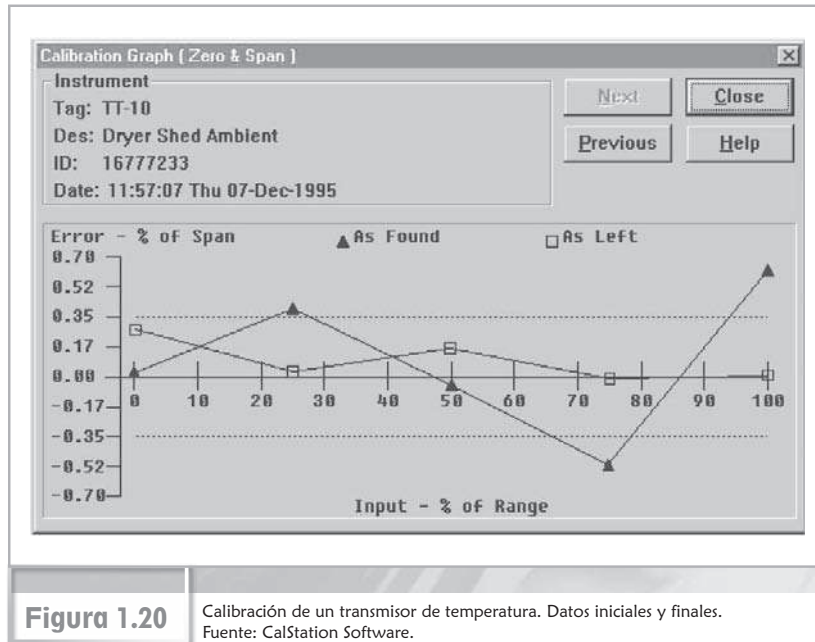
La calibración de los instrumentos requiere disponer de aparatos patrones y de dispositivos de comprobación puestos usualmente en el taller de instrumentos.

Variable%	<u>Señal neumática psi</u>	<u>Señal neumática, bar</u>	<u>mA cc</u>	<u>mA cc</u>	<u>mA cc</u>	<u>mA cc</u>	<u>mA cc</u>	<u>V cc</u>	<u>V cc</u>	<u>V cc</u>	<u>V cc</u>
0	<b>3</b>	<b>0,2</b>	<b>4</b>	1	10	0	0	<b>1</b>	0	0	0
25	<b>6</b>	<b>0,4</b>	<b>8</b>	2	20	1,25	5	<b>2</b>	2,5	12,5	25
50	<b>9</b>	<b>0,6</b>	<b>12</b>	3	30	2,5	10	<b>3</b>	5	25	50
75	<b>12</b>	<b>0,8</b>	<b>16</b>	4	40	3,75	15	<b>4</b>	7,5	37,5	75
100	<b>15</b>	<b>1</b>	<b>20</b>	5	50	5	20	<b>5</b>	10	50	100

**Tabla 1.10**

Valores generales de calibración de los instrumentos.

En la figura 1.8 puede verse un ejemplo de calibración de un instrumento con los valores que se encontraron y los calibrados para los puntos de 0%, 25%, 50%, 75% y 100% de la escala.



## 1.7 Código e identificación de los instrumentos

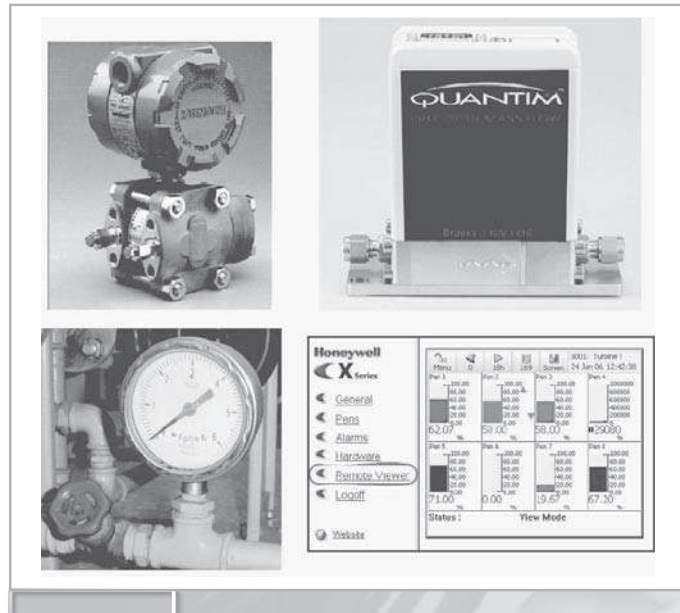
### 1.7.1 Clases de instrumentos

Los instrumentos de medición y de control son relativamente complejos y su función puede comprenderse bien si están incluidos en una clasificación adecuada. Se considerarán dos clasificaciones básicas: la primera, relacionada con la función del instrumento y la segunda, con la variable del proceso.

#### 1.7.1.1 En función del instrumento

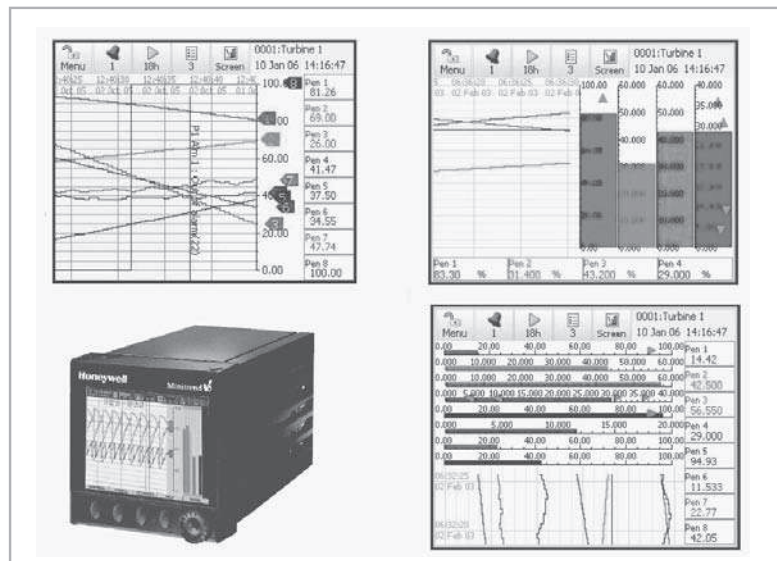
De acuerdo con la función del instrumento, obtenemos las formas siguientes:

Instrumentos ciegos (fig. 1.21), son aquellos que no tienen indicación visible de la variable. Hay que hacer notar que son ciegos los instrumentos de alarma, como presostatos y termostatos que tienen una escala exterior con un índice de selección de la variable, ya que sólo ajustan el punto de disparo del interruptor o conmutador al cruzar la variable el valor seleccionado.



**Figura 1.21** Instrumentos ciegos e indicadores.  
Fuente: Rosemount, Brooks, Bourdon y Honeywell.

Los instrumentos indicadores (fig. 1.20) disponen de un índice y una escala graduada en la que puede leerse el valor de la variable. Existen también indicadores digitales que muestran la variable en forma numérica con dígitos.



**Figura 1.22** Instrumento registrador digital.  
Fuente: Honeywell.

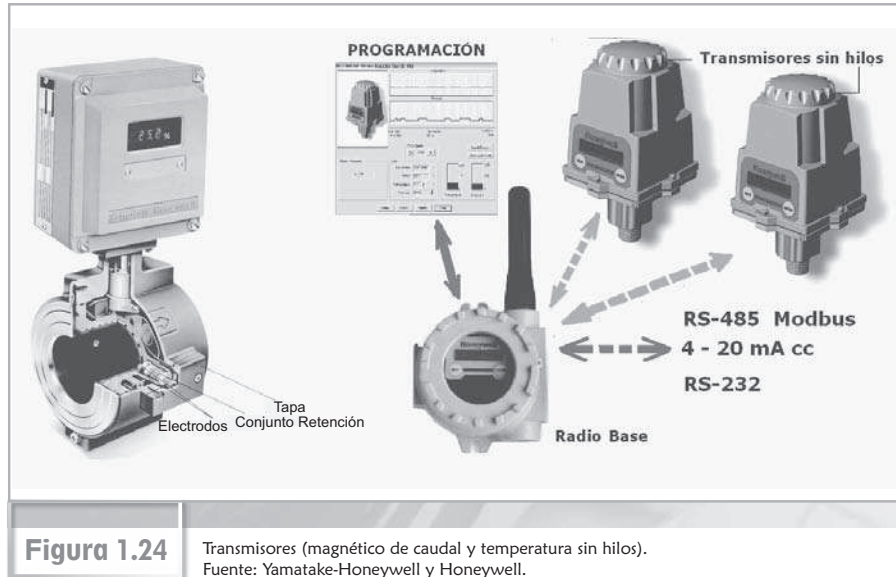
Los instrumentos registradores (fig. 1.22) registran con trazo continuo o a puntos la variable. Los clásicos pueden ser circulares o de gráfico rectangular o alargado, según sea la forma del gráfico, y los digitales no precisan papel y graban los datos registrados en CD o en *pen-drive*.

Los sensores captan el valor de la variable de proceso y envían una señal de salida predeterminada. El sensor puede formar parte de otro instrumento (por ejemplo, un transmisor) o bien puede estar separado. También se denomina detector o elemento primario (fig. 1.23) por estar en contacto con la variable, con lo que utiliza o absorbe energía del medio controlado para dar al sistema de medición una indicación en respuesta a la variación de la variable. El efecto producido por el elemento primario puede ser un cambio de presión, fuerza, posición, medida eléctrica, etc. Por ejemplo, en los elementos primarios de temperatura de bulbo y capilar, el efecto es la variación de presión del fluido que los llena y en los de termopar se presenta una variación de fuerza electromotriz.

**Figura 1.23**

Sensores y elementos primarios.  
Fuente: Honeywell.

Los transmisores (fig. 1.24) captan la variable de proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática de margen 0,2 a 1 bar (20 a 100 kPa) (3 a 15 psi - libras por pulgada cuadrada) o electrónica de 4 a 20 mA de corriente continua o bien digital. La señal digital es la más ampliamente utilizada y es apta directamente para las comunicaciones, ya que utiliza protocolos estándar.



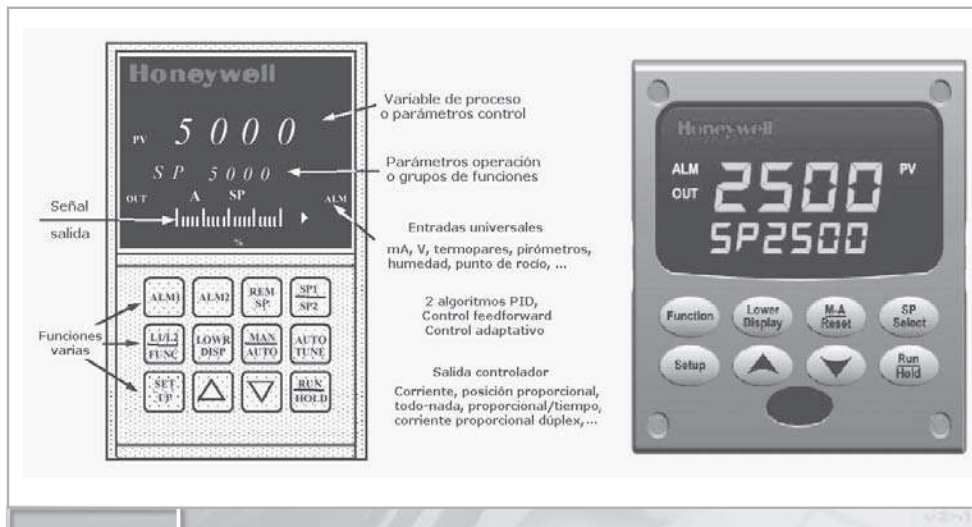
Los transductores reciben una señal de entrada en función de una o más cantidades físicas y la convierten modificada o no a una señal de salida. Son transductores un relé, un elemento primario, un transmisor, un convertidor PP/I (presión de proceso a intensidad), un convertidor PP/P (presión de proceso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

Los convertidores son aparatos que reciben una señal de entrada neumática (3-15 psi) o electrónica (4-20 mA c.c.) procedente de un instrumento y después de modificarla envían la resultante en forma de señal de salida estándar. Ejemplo: un convertidor P/I (señal de entrada neumática a señal de salida electrónica, un convertidor I/P (señal de entrada eléctrica a señal de salida neumática).

Los receptores reciben las señales procedentes de los transmisores y las indican o registran. Los receptores controladores envían otra señal de salida normalizada a los valores ya indicados 0,2 a 1 bar (20 a 100 kPa) (3 a 15 psi) en señal neumática, o 4-20 mA c.c. en señal electrónica, que actúan sobre el elemento final de control.

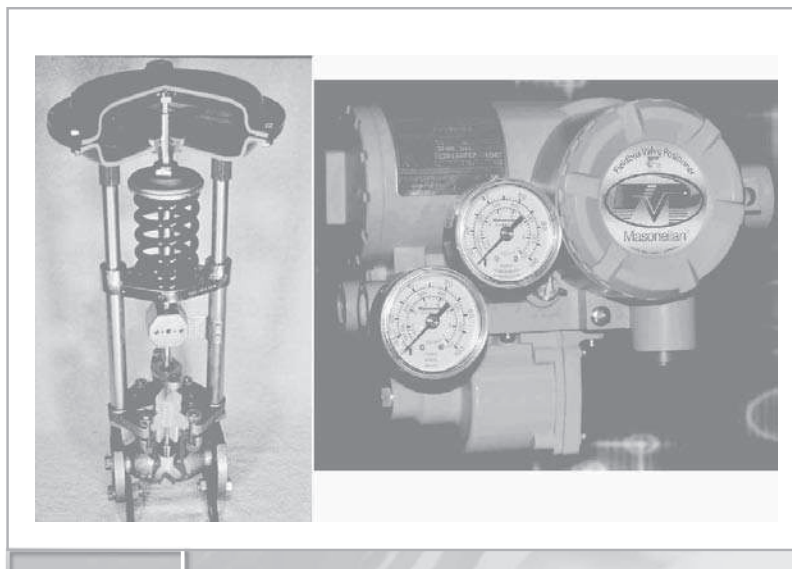
Los controladores (fig. 1.25) comparan la variable controlada (presión, nivel, temperatura) con un valor deseado y ejercen una acción correctiva de acuerdo con la desviación.

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.



**Figura 1.25** Controladores.  
Fuente: Honeywell.

El elemento final de control (fig. 1.26) recibe la señal del controlador y modifica su posición variando el caudal de fluido.



**Figura 1.26** Elemento final de control (válvula y posicionador).  
Fuente: Honeywell y Masoneilan.

En el control neumático, el elemento suele ser una válvula neumática o un servomotor neumático que efectúan su acción completa de 0,2 a 1 bar (20 a 100 kPa) (3 a 15 psi). En el control electrónico o digital, la válvula o el servomotor anteriores son accionados a través de un convertidor de intensidad a presión (I/P) o señal digital a presión que convierte la señal electrónica de 4 a 20 mA cc. o digital a neumática.

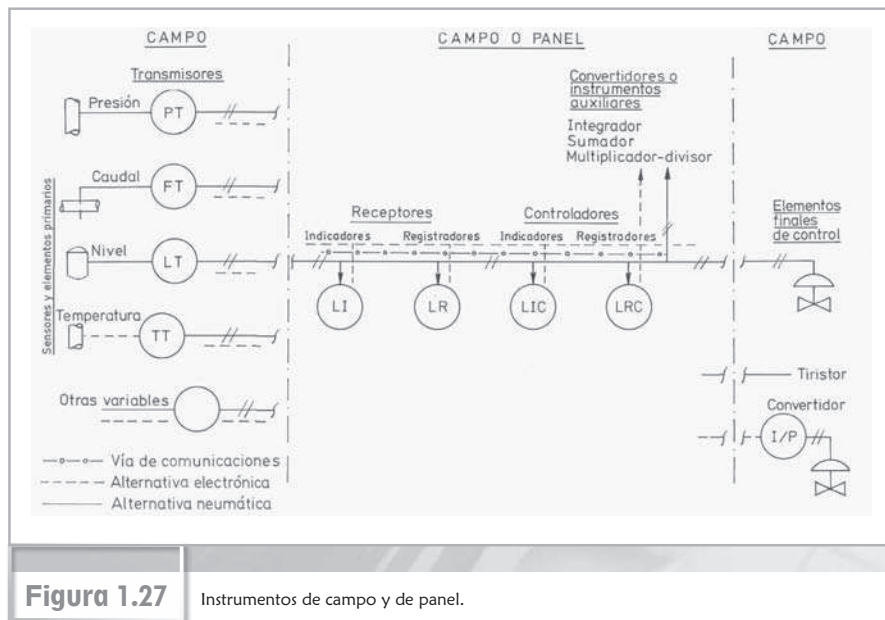
En el control eléctrico el elemento suele ser una válvula motorizada que efectúa su carrera completa accionada por un servomotor eléctrico.

#### 1.7.1.2 En función de la variable del proceso

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

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

Los instrumentos se consideran instrumentos de campo y de panel (fig. 1.27). La primera designación incluye los instrumentos locales situados en el proceso o en sus proximidades (es decir, en tanques, tuberías, secadores, etc.), mientras que la segunda se refiere a los instrumentos montados en paneles, armarios o pupitres situados en zonas aisladas o en zonas del proceso.



**Figura 1.27**

Instrumentos de campo y de panel.

### 1.7.2 Código de identificación de instrumentos

Para designar y representar los instrumentos de medición y control se emplean normas muy diversas que a veces varían de una industria a otra. Esta gran variedad de normas y sistemas utilizados en las organizaciones industriales indica la necesidad universal de una normalización en este campo. Varias sociedades han dirigido sus esfuerzos en este sentido, y entre ellas se encuentran como más importantes la ISA (Instrument Society of America o Sociedad de Instrumentos de Estados Unidos) y la DIN alemana.

Hay que señalar al lector que estas normas no son de uso obligatorio sino que constituyen una recomendación a seguir en la identificación de los instrumentos en la industria.

	PRIMERA LETRA (4)		LETRAS SUCESIVAS (3)		
	VARIABLE MEDIDA O INICIAL	LETRA DE MODIFICACIÓN	LECTURA O FUNCIÓN DE LECTURA PASIVA	FUNCIÓN DE SALIDA	LETRA DE MODIFICACIÓN
A	Análisis(5, 19)		Alarma		
B	Quemador, combustión		Libre(1)	Libre(1)	Libre(1)
C	Libre (1)			Control (13)	
D	Libre (1)	Diferencial (4)			
E	Tensión (f.e.m.)		Sensor (Elemento primario)		
F	Caudal	Relación (4)			
G	Libre (1)		Vidrio, Dispositivo visión (9)		
H	Manual				Alto (7,15,16)
I	Corriente (eléctrica)		Indicar (10)		
J	Potencia	Exploración (7)			
K	Tiempo, programación tiempo	Variación de tiempo (4,21)		Estación de control (22)	
L	Nivel		Luz (11)		Bajo (7,15,16)
M	Libre (1)	Momentáneo (4)			Medio, Intermedio (7,15)
N	Libre (1)		Libre (1)	Libre (1)	Libre (1)
O	Libre (1)		Orificio, Restricción		
P	Presión, Vacío		Punto (Ensayo) Conexión		
Q	Cantidad	Integrar, Totalizar (4)			
R	Radiación		Registro (17)		
S	Velocidad, Frecuencia	Seguridad (8)		Interruptor (13)	
T	Temperatura			Transmisión (18)	
U	Multivariable (6)		Multifunción (12)	Multifunción (12)	Multifunción (12)
V	Vibración, Análisis mecánico (19)			Válvula, Regulador tiro, Persiana (13)	
W	Peso, fuerza		Vaina, Sonda		
X	Sin clasificar (2)	Eje X	Sin clasificar (2)	Sin clasificar (2)	Sin clasificar (2)
Y	Evento, Estado o Presencia (20)	Eje Y		Relé, Cálculo, Conversión (13,14,18)	
Z	Posición, Dimensión	Eje Z		Motor,Actuador, Elemento final de control sin clasificar	

**Tabla 1.11**

Código de los instrumentos  
ANSI/ISA-S51.1-1979 (R 1993) (26 de mayo de 1995)

	GRUPO 1: VALORES DE MEDICIÓN U OTROS VALORES DE ENTRADA	GRUPO 2: ELABORACIÓN, FUNCIONES DEL PROCESO
	PRIMERA LETRA (2)	LETRA 1) COMPLEMENTARIA LETRA SUCESIVA 2) SECUENCIA: I, R, C, .... etc.
A	Nota (3)	Aviso del valor límite, alarma
B		
C	Nota (3)	Control automático
D	Densidad	Diferencial Nota (1)
E	Valores eléctricos (9)	Función de sensibilidad
F	Caudal, cantidad, paso	Relación Nota (1)
G	Distancia, longitud, posición	
H	Manual	Valor límite superior (8)
I	Nota (3)	Indicación
J	Nota (3)	Nota (1)
K	Tiempo	
L	Nivel y nivel separación	Valor límite inferior (8)
M	Humedad	Valor intermedio (8)
N	Libre (4)	
O	Libre (4)	Señal visual, indicación SI y NO
P	Presión	
Q	Calidad o propiedades del material (análisis, propiedades sustancia) (exento D, M, V.), (5), (9)	Integral, suma Nota (1)
R	Radiación (9)	Registro o impresión (7)
S	Velocidad lineal, velocidad rotacional, frecuencia	Disposición del circuito, control secuencial
T	Temperatura	Transmisor, transductor
U	Multivariable (6)	
V	Viscosidad	Función de la válvula de control o Equipo de regulación
W	Fuerza por peso, masa, fuerza	
X	Demás valores (4)	
Y	Libre (4)	Función de cálculo
Z		Interrupción de emergencia, dispositivo de seguridad

Tabla 1.12

Códigos de la norma DIN 19227

## Capítulo

# 2

# Transmisores

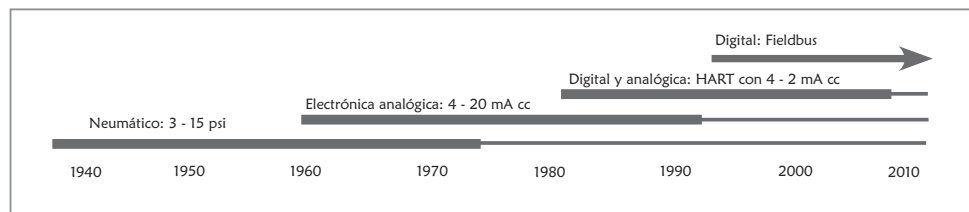
## 2.1 Generalidades

Los transmisores captan la variable de proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática, electrónica o digital.

La señal neumática es de 20 a 100 kPa (0,2 – 1 bar), equivalente a 3 a 15 psi (libras por pulgada cuadrada).

La señal electrónica normalizada es de 4 a 20 mA de corriente continua.

La señal digital consiste en una serie de impulsos en forma de bits. Cada bit consiste en dos signos, el 0 y el 1 (código binario) y representa el paso (1) o no (0) de una señal a través de un conductor. Si la señal digital que maneja el microprocesador del transmisor es de 32 bits, entonces puede enviar 32 señales binarias (0 y 1) simultáneamente.



**Figura 2.1** Evolución de las señales de transmisión.

Las señales neumática y electrónica se utilizan cada vez menos en beneficio de la señal digital, por las ventajas que esta ofrece en exactitud, en facilidad de comunicaciones y en grabación de la memoria histórica de las variables de proceso. La señal neumática ha quedado prácticamente relegada a su uso en las válvulas de control y en los posicionadores electro-neumático y dígito-neumático.

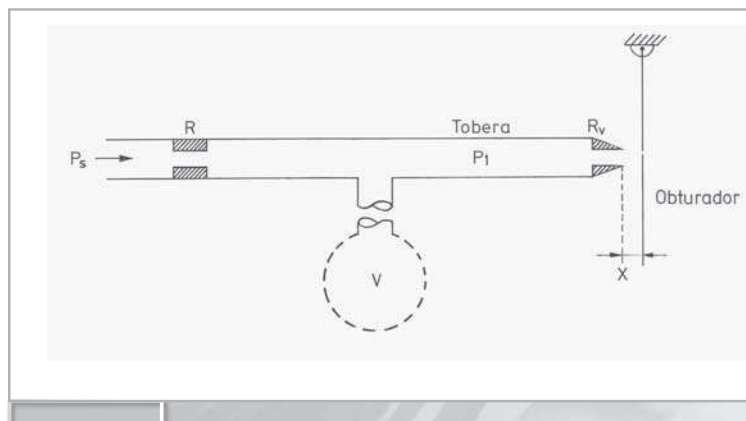
La exactitud que se consigue con las diferentes señales de transmisión es:

- $\pm 0,5\%$  en los neumáticos.
- $\pm 0,3\%$  en los electrónicos.
- $\pm 0,15\%$  en los “inteligentes” con señal de salida de 4 a 20 mA c.c
- $\pm 0,1\%$  en los digitales.

En lo que sigue se describirán sucintamente los transmisores neumáticos, electrónicos y digitales, las comunicaciones y los calibradores especiales existentes en el mercado y que en un mismo aparato disponen de todos los sistemas de generación y medida de la señal de la variable, lectura de la misma y de la señal de salida.

## 2.2 Transmisores neumáticos

Los transmisores neumáticos se basan en el sistema tobera-obturador que, mediante bloques amplificadores con retroalimentación por equilibrio de movimientos o de fuerzas, convierte el movimiento del elemento primario de medición a una señal neumática de 20 a 100 kPa (0,2 – 1 bar) (3 - 15 psi), siendo su exactitud del orden de  $\pm 0,5\%$ .

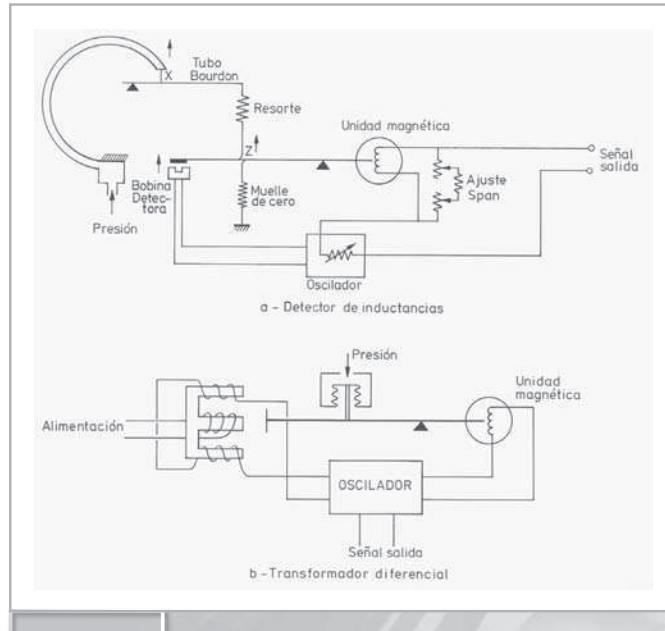


**Figura 2.2** Transmisor neumático.

Los transmisores neumáticos, al tener muy pequeño el diámetro de la tobera, del orden de 0,1 a 0,2 mm, son susceptibles de mal funcionamiento, debido a las partículas de aceite o polvo que puedan tapan la tobera. Este problema de mantenimiento unido al hecho de que no pueden guardar las señales de planta, hace que se utilicen cada vez menos.

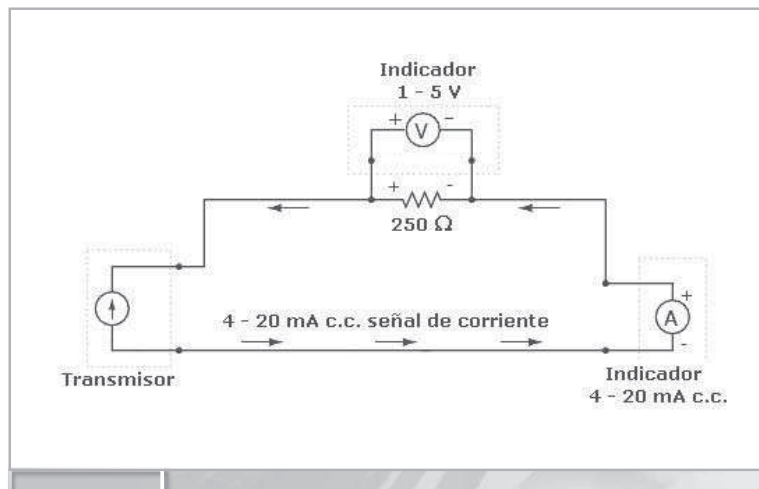
## 2.3 Transmisores electrónicos

Basados en detectores de inductancia, o utilizando transformadores diferenciales o circuitos de puente de Wheatstone, o empleando una barra de equilibrio de fuerzas, convierten la señal de la variable a una señal electrónica de 4-20 mA c.c. Su exactitud es del orden de  $\pm 0,5\%$ .



**Figura 2.3** Transmisores electrónicos.

Análogamente a los instrumentos neumáticos, no pueden guardar las señales de planta, y además son sensibles a vibraciones, por cuyo motivo su empleo ha ido disminuyendo.



**Figura 2.4** Señal electrónica de 4 - 20 mA c.c y 0 - 1 V c.c.

En la tabla 2.1 pueden verse las señales neumáticas y electrónicas utilizadas en la industria.

Variable medida	Señales neumáticas			Señales electrónicas	
	Porcentaje	Bar	kPa	psi	Señal 4 - 20 mA cccc
0	0,2	20,0	3,0	4,0	1,0
10	0,28	28,0	4,2	5,6	1,4
20	0,36	36,0	5,4	7,2	1,8
25	0,4	40,0	6,0	8,0	2,0
30	0,44	44,0	6,6	8,8	2,2
40	0,52	52,0	7,8	10,4	2,6
50	0,6	60,0	9,0	12,0	3,0
60	0,68	68,0	10,2	13,6	3,4
70	0,76	76,0	11,4	15,2	3,8
75	0,8	80,0	12,0	16,0	4,0
80	0,84	84,0	12,6	16,8	4,2
90	0,92	92,0	13,8	18,4	4,6
100	1	100,0	15,0	20,0	5,0

**Tabla 2.1**

Señales neumáticas y electrónicas utilizadas en la industria.

## 2.4 Transmisores digitales

### 2.4.1 Generalidades

La señal digital está formada por una serie de impulsos en forma de bits. Cada bit consiste en dos signos, el 0 y el 1 (código binario) y representa el paso (1) o no (0) de una señal a través de un conductor.

Si la señal es de 16 bits entonces puede manejar 16 señales binarias (0 y 1). Siendo el mayor número binario de 16 cifras:

$$1111111111111111 = 1 + 1*2 + 1*2^2 + 1*2^3 + \dots + 1*2^{15} = 65536$$

La exactitud de la señal digital de 16 bits es:  $\frac{1}{65.536} * 100 = \pm 0,0015\%$

Si la señal es de 24 bits entonces puede manejar 24 señales binarias (0 y 1). Siendo el mayor número binario de 24 cifras:

$$111111111111111111111111 = 1 + 1*2 + 1*2^2 + 1*2^3 + \dots + 1*2^{23} = 16.777.215$$

La exactitud es de:  $\frac{1}{17.777.215} * 100 = \pm 0,0015\%$

Y si la señal es de 32 bits entonces puede manejar 32 señales binarias (0 y 1) y siendo el mayor número binario de 32 cifras.

$$111111\dots1111111111 = 1+1*2+1*2^2+1*2^3+\dots+1*2^{31} = 8.589.833.772$$

La exactitud es:  $\frac{1}{8.589.833.772} * 100 = \pm 0,000.000.001.16\%$

En los valores anteriores no se considera la exactitud del sensor de la variable.

El término “inteligente” (*smart*) indica que el instrumento es capaz de realizar funciones adicionales a la de la simple transmisión de la señal del proceso. Estas funciones adicionales pueden ser:

**Cambio automático del campo de medida**, en el caso en que el valor de la variable salga del campo y fijación de la variable en el último valor alcanzado, en el caso en que se detecte alguna irregularidad en el funcionamiento del aparato.

**Compensación de las variaciones de temperatura y tensiones de referencia de los transmisores y autoajuste desde el panel de control.**

**Grabación de datos históricos.** La señal digital permite guardar los datos y analizarlos con más detalle posteriormente.

**Mantenimiento.** Mientras que los instrumentos convencionales deben calibrarse normalmente en el taller de instrumentos, los instrumentos “inteligentes” no precisan de aparatos patrón para su calibración ya que disponen de datos almacenados en EPROM en fábrica (bajo normas NBS). Su utilización representa un ahorro de 95% en los costos de recalibración de los instrumentos efectuados en los instrumentos convencionales.

**Rangeability (relación señal máxima / señal mínima o dinámica de medida).** En variables específicas, como el caudal, el transmisor inteligente proporciona una mejora en la relación caudal máximo / caudal mínimo que pasa de 3:1 en la placa orificio (o tobera o tubo venturi) a 10:1 manteniendo la misma exactitud de  $\pm 1\%$ , lo que posibilita la reducción drástica del número de transmisores en stock al poder utilizar prácticamente un solo modelo para cubrir los diferentes campos de medida.

**Autocalibración por variaciones del proceso.** Los transmisores inteligentes pueden disponer de autocalibración. Un ejemplo lo constituyen los transmisores de nivel por ultrasonidos. Disponen de un reflector de las ondas sónicas que está situado en el tanque sobre la superficie del líquido, y hacia donde el emisor dirige periódicamente los ultrasonidos, ajustando entonces los parámetros de calibración. De este modo compensa las variaciones de velocidad del sonido provocadas por cambios en la temperatura del ambiente del tanque. En otros casos, la autocalibración es más difícil de conseguir. Tal ocurre en los medidores magnéticos de caudal en los que durante los

intervalos de calibración sería necesario pasar por el elemento un caudal conocido de un fluido determinado.

**Autodiagnóstico.** Los transmisores inteligentes pueden incorporar el autodiagnóstico de sus partes electrónicas internas, lo que proporciona al departamento de mantenimiento: primero el conocimiento de la existencia de un problema en el circuito, segundo el diagnóstico y la naturaleza del problema, señalando qué instrumento ha fallado, y tercero, las líneas a seguir para la reparación o sustitución del instrumento averiado.

**Comunicador portátil.** Un comunicador portátil dotado de visualizador de cristal líquido y teclado alfanumérico permite comprobar desde el propio transmisor o bien desde el controlador, o desde cualquier punto de la línea de conexión, el estado y calibración del transmisor. Así pues, a diferencia de los instrumentos convencionales, ya no es necesario para calibrar estos instrumentos su desmontaje del proceso y su transporte al taller de instrumentos.

**Ordenador personal (PC).** El transmisor o varios transmisores pueden conectarse, a través de una conexión RS-232, a un ordenador personal, que con el software adecuado es capaz de configurar transmisores inteligentes.

Sin embargo, existen algunas desventajas:

**Normalización de las comunicaciones digitales,** no está plenamente resuelta.

**Respuesta frecuencial defectuosa.** Dependiendo de la frecuencia de la señal, ésta será transmitida con poca fidelidad por el retardo inherente del microprocesador que debe realizar secuencialmente diferentes acciones de cálculo. Si la señal es rápida, por ejemplo, presión y caudal, o bien interesa la máxima fidelidad en la señal tal como en temperatura, el microprocesador responderá con retraso, con lo cual la señal quedará distorsionada. En casos especiales debe valorarse este último punto, y en caso de no poder admitirse esta distorsión deben emplearse instrumentos clásicos analógicos que son de respuesta mucho más rápida.

La exactitud de los instrumentos digitales puede alcanzar  $\pm 0,1\%$ .

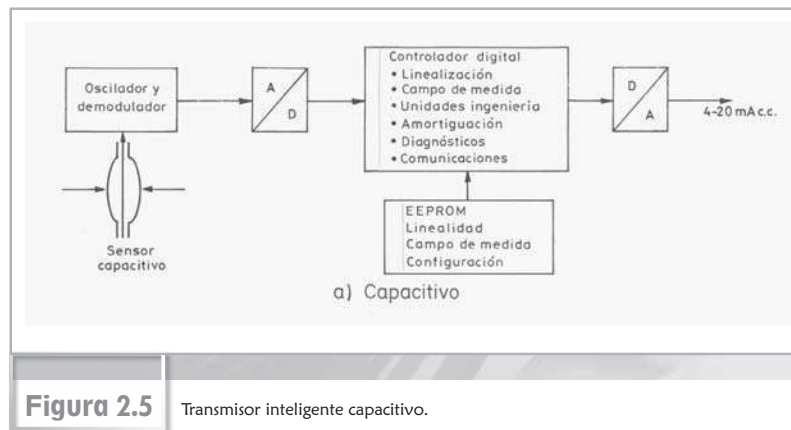
Mediante el bus de campo es posible transmitir digitalmente en serie las señales de los transmisores al sistema de comunicaciones y a los controladores (control distribuido, controladores programables, bloques de control). De este modo se mejora la exactitud de los datos y la fiabilidad, se reduce la mano de obra de cableado y es posible disponer de una función de mantenimiento remoto.

Mientras el elemento primario en contacto con el fluido de proceso no se averíe, el transmisor inteligente tiene una vida útil casi ilimitada. Debe señalarse que el transmisor analógico puede presentar averías por desgaste mecánico de los tornillos de ajuste de cero y *span* provocado por un gran número de calibraciones realizadas por el instrumentista a lo largo del tiempo.

Hay dos modelos básicos de transmisores digitales inteligentes, el capacitivo y el piezorresistivo.

### 2.4.2 Transmisor inteligente capacitivo

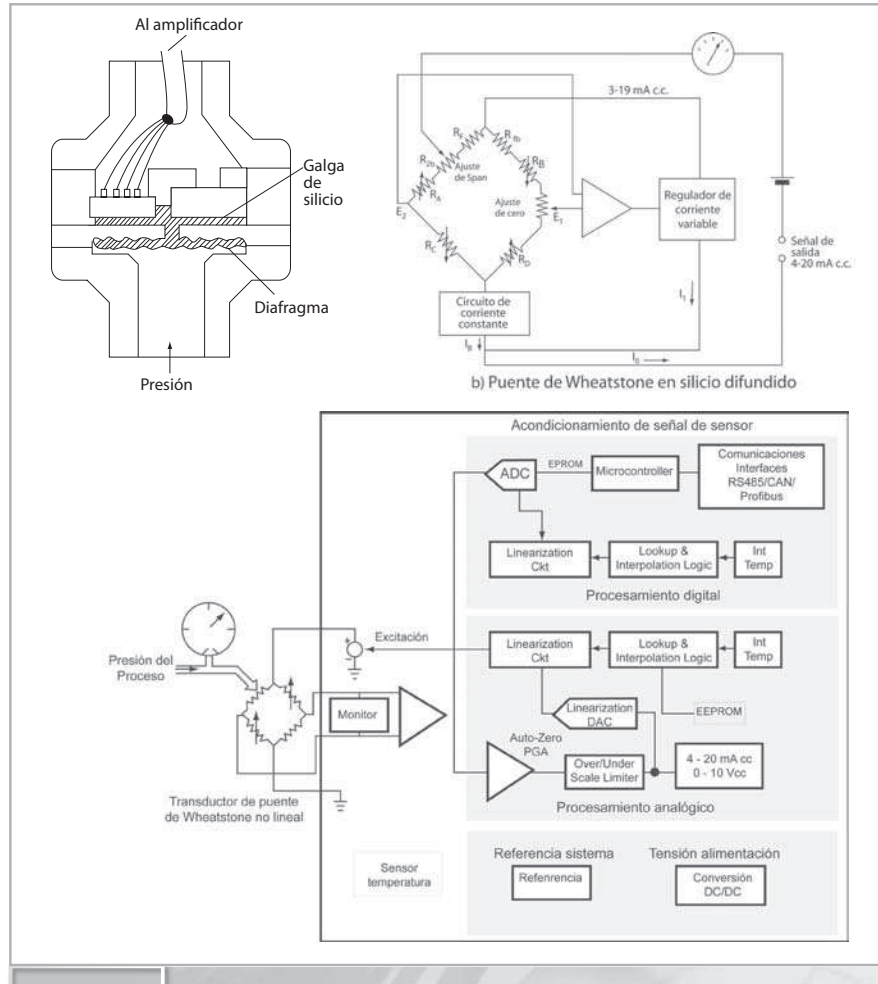
El transmisor capacitivo está basado en la variación de capacidad que se produce en un condensador formado por dos placas fijas y un diafragma sensible interno y unido a las mismas, cuando se les aplica una presión o presión diferencial a través de dos diafragmas externos. La transmisión de la presión del proceso se realiza a través de un fluido (aceite) que rellena el interior del condensador. El desplazamiento del diafragma sensible es de sólo 0,1 mm como máximo. Un circuito formado por un oscilador y demodulador transforma la variación de capacidad en señal analógica. Esta a su vez es convertida a digital y pasa después a un microprocesador “inteligente” que la transforma a la señal analógica de 4 - 20 mA c.c y alimenta las comunicaciones digitales.



### 2.4.3 Transmisor inteligente piezorresistivo

Este transmisor aprovecha las propiedades eléctricas de los semiconductores al ser sometidos a tensiones. Está fabricado a partir de una delgada película de silicio y utiliza técnicas de dopaje para generar una zona sensible a los esfuerzos. Se comporta como un circuito dinámico de puente de Wheastone que incorpora un microprocesador, linealiza las señales y entrega una señal de salida de 4 – 20 mA c.c.

El instrumento se calibra para “null” y “sensibilidad” usando la opción de comunicaciones RS232/RS485.

**Figura 2.6**

Transmisor inteligente piezorresistivo.  
Fuente: Honeywell y Texas.

## 2.5 Comunicaciones

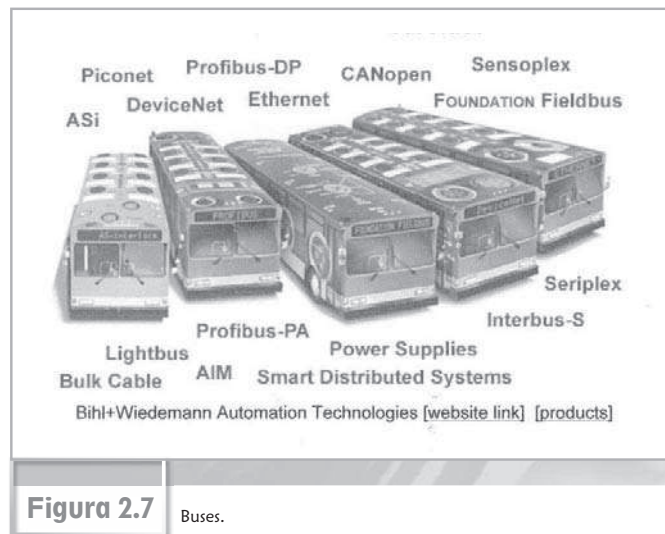
### 2.5.1 Generalidades

Las comunicaciones entre los instrumentos de proceso y el sistema de control se basan en señales analógicas neumáticas, electrónicas de 4-20 mA c.c y digitales, siendo estas últimas capaces de manejar grandes volúmenes de datos y guardarlos en unidades históricas, las que están aumentando día a día sus aplicaciones.

En áreas remotas o de difícil acceso tienen cabida los transmisores sin hilos típicamente de presión, señales acústicas y temperatura que transmiten sus medidas

a un aparato base de radio conectado a un sistema de control o de adquisición de datos.

La exactitud de las señales digitales es de unas 10 veces mayor que la señal clásica de 4-20 mA c.c. En vez de enviar cada variable por un par de hilos (4-20 mA c.c), transmiten secuencialmente las variables a través de un cable de comunicaciones llamado bus. El término bus indica pues el transporte secuencial de señales eléctricas que representan información codificada de acuerdo con un protocolo.



**Figura 2.7** Buses.

Los fabricantes de sistemas de comunicaciones empezaron con sus propios sistemas llamados propietarios, es decir, sin que fuera posible intercambiar sus aparatos con los de otros fabricantes. Sin embargo, han llegado por lógica a fabricar sistemas abiertos, debido a la demanda del mercado. Es natural que un fabricante se resista a divulgar su sistema debido al alto coste que ha pagado por la investigación y el desarrollo de su producto, pero el deseo del cliente a la larga se impone.

### 2.5.2 Protocolos serie

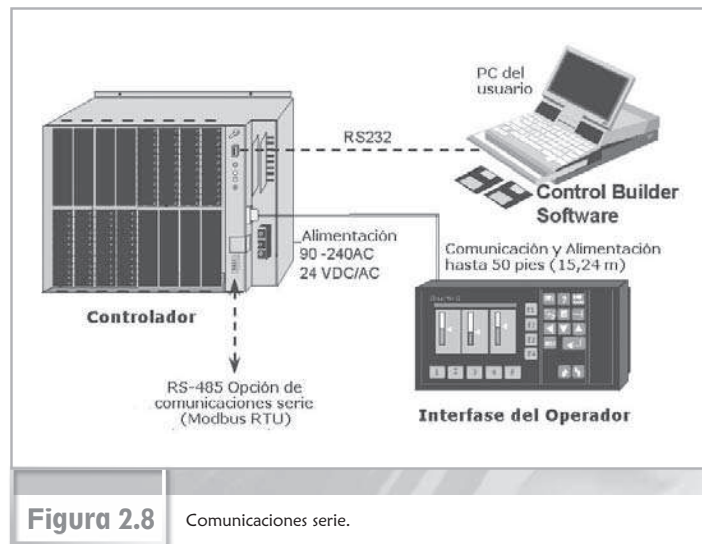
Las comunicaciones entre instrumentos se iniciaron con el puerto serie por el cual se puede realizar la configuración del mismo, ver diagnósticos, tendencias, etc.

Las *interfases* serie más extendidas son:

**RS-232.** Dispone de tres conductores: uno de transmisión, otro de recepción y un tercero de retorno de corriente común para ambos tipos de datos, que constituye la fuente principal de limitaciones de este tipo de interfase. El cable actúa como una antena que no solamente irradia señales a los circuitos próximos sino que también es susceptible de recibir señales indeseadas procedentes de fuentes externas y debe apantallarse en las instalaciones industriales.

Los datos se transmiten en lógica negativa, es decir, los “unos” se traducen en una tensión continua negativa y los “ceros” en una tensión continua positiva. La tensión más comúnmente utilizada es  $\pm 12$  V cc.

La distancia máxima de transmisión entre el equipo de transmisión de datos (DTE) y el equipo de comunicación de datos (DCE) es de unos 15 m y la velocidad de transmisión máxima es de 20 Kbaud (9.200 bauds en el entorno industrial; 1 baudio = bit/segundo).



**RS-422.** Apareció en 1978, diseñado para satisfacer las demandas de mayor distancia y mayor velocidad de transmisión. Puede alcanzar los 1200 m, pero para la velocidad máxima de 10 Mbaud la distancia queda limitada a 60 m.

**RS-485.** Introducido en 1993 por Electronic Industries Association (EIA), este estándar está diseñado para comunicaciones multipunto y se aplica cuando es prioritario garantizar al máximo la integridad de los datos transmitidos. La distancia de comunicación máxima es de 1200 m y la velocidad de transmisión 10 Mbit/s.

### 2.5.3 Protocolos híbridos

Los *protocolos híbridos* utilizan el estándar analógico de comunicación 4-20 mA c.c e incorporan además un protocolo de comunicación digital. Son:

**DE.** Desarrollado por la empresa Honeywell, consiste en una modulación en corriente correspondiendo al estado discreto “1” una corriente de 20 mA c.c y al estado “0”, 4 mA c.c. Es compatible con la señal analógica 4-20 mA c.c pero no simultáneamente. Usa un protocolo privado.

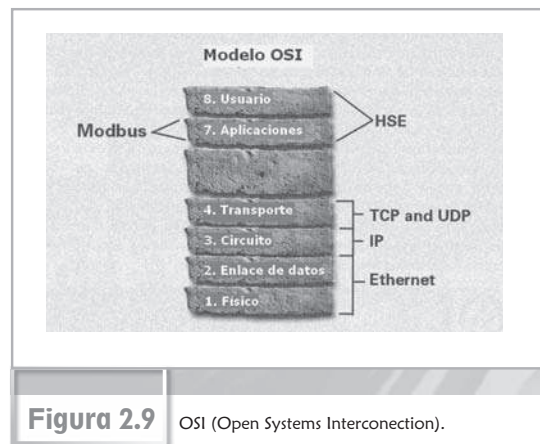
**INTENSOR.** Es un protocolo de propiedad de Endress & Hauser.

**BRAIN.** De la empresa Yokogawa, consiste en una modulación de impulsos codificados cuyo estado discreto "1" corresponde a la ausencia de pulsos, mientras que el estado "0" corresponde a una secuencia de dos pulsos de subida y dos de bajada alternos con una amplitud de 2 mA c.c. Dicha señal va modulada sobre la señal 4-20 mA cc, la que no es afectada ya que la señal resultante es nula.

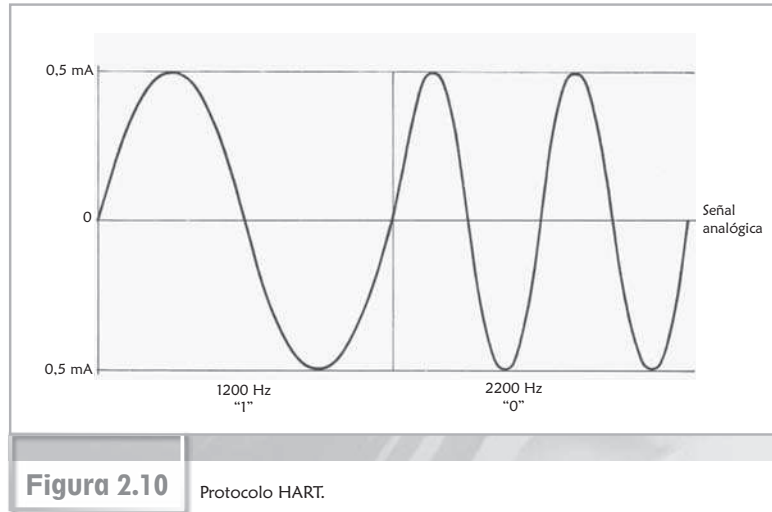
**FOXCOM.** Es un protocolo de propiedad de la compañía Foxboro.

**FSK.** Desarrollado por Elsag Bailey Hartman and Braun (grupo ABB), basado en una modulación en frecuencia. La distancia máxima es 1,6 km. Es propietario.

**HART.** El protocolo HART (High way - Addressable-Remote-Transducer) fue desarrollado originariamente por la firma Rosemount pero, dada su gran aceptación, ha sido extendido a otros muchos fabricantes. Rosemount creó la fundación HART, a la que han adherido decenas de fabricantes de todo el mundo.



El protocolo HART sigue el modelo de referencia OSI (Open Systems Interconnections) propuesto por ISO (Organización Internacional de Normalización), si bien implementa del modelo sólo los niveles 1, 2 y 7, ya que los otros niveles no se hacen necesarios para este tipo de comunicación. El nivel 1 (nivel físico) conecta físicamente los dispositivos y modula en frecuencia una señal de  $\pm 0.5$  mA de amplitud superpuesta a la señal analógica de salida del transmisor de 4-20 mA c.c. Codifica los estados lógicos 1 y 0 con las frecuencias de 1.200 Hz para el 1 y 2.200 Hz para el 0 en forma senoidal. Como la señal promedio de una onda senoidal es cero, no se añade ningún componente de c.c a la señal analógica de 4-20 mA c.c.



El nivel 2 (nivel de enlace) se encarga de formar y comprobar la trama de los mensajes de acuerdo con la especificación del protocolo HART. La trama incluye una comprobación de doble paridad para asegurar la integridad máxima de los datos transmitidos.

El nivel 7 (nivel de aplicación) se basa en la utilización de comandos HART, conjunto de comandos que se envían al transmisor para obtener información de los datos y cambiar la configuración de los parámetros a distancia.

El protocolo HART permite soportar hasta 256 variables, los transmisores pueden conectarse entre sí a través de un bus y comunicarse con 15 aparatos (PLC, ordenadores, ...)

La integración digital de los instrumentos con los sistemas de control queda implantada definitivamente con los *buses de campo* pudiendo aprovechar toda la potencialidad de los microprocesadores desde el punto de vista de configuración, diagnósticos, mantenimiento, etc.

El primer bus de campo, efectivamente abierto, utilizado ampliamente fue el MODBUS de Gould Modicon que solo disponía de los niveles 1 (físico) y 2 (enlace).

#### 2.5.4 Protocolos abiertos

Los protocolos de comunicaciones abiertos importantes son HART, World FIB, ISP, BITBUS, INTERBUS-S, P-NET, ECHELON y CAN. De ellos, los que usan el protocolo Fieldbus son WorldFIP (usa H1 y H2) y Profibus PA (sólo usa H1). Los restantes no utilizan ninguna parte del estándar fieldbus y por tanto no son *fieldbuses*.

Los buses de campo existentes en el mercado en la actualidad son, entre otros:

Lonworks, Interbus, ASI, Devicenet, CAN, P-NET, World FIP, Profibus y Foundation Fieldbus.

#### 2.5.4.1 Profibus

PROFIBUS es una red abierta, muy popular en Europa, estándar e independiente de fabricantes (interoperable). El nivel físico cumple la norma IEC1158-2 y la IEC61158-2 y posibilita la alimentación de los equipos por el mismo par de hilos.

El nivel de usuario normaliza las funciones básicas de todos los instrumentos de tal manera que aparatos de distintos fabricantes son intercambiables. Así, si se cambia un medidor de caudal de un fabricante por otro, la lectura será la misma. Todos los parámetros accesibles al usuario como código (tag) del instrumento, unidades, descripción, alarmas, diagnósticos, etc., son suministrados mediante ficheros en lenguaje DDL (Device Description Language).

#### 2.5.4.2 Foundation Fieldbus

Foundation Fieldbus (FF) es un bus de datos digital, serie y multipunto entre dispositivos de campo y/o sistemas de un entorno industrial. El estándar fieldbus está diseñado para satisfacer las necesidades restrictivas establecidas por la norma IEC 1158-2. La idea básica del estándar fieldbus es obtener más información sobre el proceso y sobre el propio instrumento, que naturalmente debe ser inteligente (*smart*), y establecer reglas de rendimiento, seguridad y detección de errores.

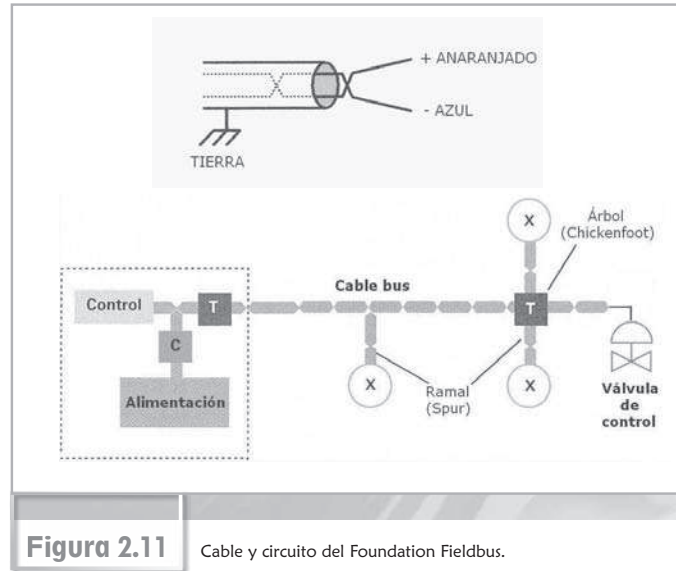
La Fundación Fieldbus (Fieldbus Foundation) fue creada en 1994 mediante la unión de ISP y WorldFIP, para definir un único estándar según las normas IEC-ISA (International Electric Company / Instrument Society of America). Es una organización sin ánimo de lucro formada por los casi 120 proveedores y usuarios más importantes de automatización y control de procesos.

Básicamente, la instalación está formada por un par de cables torsionado con un blindaje puesto a tierra, que conecta los dispositivos de la sala de control (que pueden estar en campo en pequeñas instalaciones) con los instrumentos de campo (transmisores, válvulas de control, ...) Estos pueden conectarse entre sí mediante un bloque de terminales con topología en árbol (*chickenfoot*), o bien a lo largo del cable en ramales (*spur*). Un *terminator* acopla la impedancia del cable para reducir reflexiones de la señal, y un acondicionador de alimentación separa la fuente de alimentación convencional del cableado del fieldbus.

Cada mensaje se compone de una señal previa, una señal delimitadora de arranque y una señal delimitadora de fin, e intercalada entre estas dos últimas una señal de datos de longitud máxima 266 bytes que contiene la dirección del instrumento, su identificación, los valores de medida, etc.

Para especificar qué instrumento puede transmitir, y no llenar la línea de un caos de mensajes, un aparato especial llamado Programador Activo de Enlace (Link Active Scheduler, LAS) envía un mensaje especial a cada instrumento para permitir que efectúe su transmisión.

Otro aparato de enlace (*linking device*) interconecta los 31,25 kbits/s de los *fieldbuses* (tarjeta H1) y los hace accesibles a la red Ethernet de alta velocidad (HSE = High Speed Ethernet) de 1 Mbit/s a 2,5 Mbit/s (tarjeta H2). Como la red Ethernet utiliza protocolos estándar, por ejemplo TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol), el equipo HSE (interruptores, ...) puede crear circuitos de gran longitud.

**Figura 2.11**

Cable y circuito del Foundation Fieldbus.

La tensión normal de alimentación es de 24 V cc cc. Puede comprobarse la resistencia del cable Fieldbus con un polímetro digital normal, midiéndola desde un extremo del cable con el otro extremo en cortocircuito. La resistencia de cada uno de los cables al aislamiento debe ser de 10 kohm o superior.

Un *tester* de cable de Fieldbus está formado por dos partes, transmisora y receptora, que se fijan en las partes extremas del cable. En el ensayo, luces en el receptor indican el buen funcionamiento del par de cables para que circulen las señales de Fieldbus.

Las comunicaciones del Foundation Fieldbus utilizan dos tipos de tarjetas:

- La tarjeta H1 es de baja velocidad (31,25 kbits/s) de uso normal en la industria en instrumentos de proceso y en válvulas.
- La tarjeta H2 es de alta velocidad (1,0/2,5 Mbits/s) en desarrollo y aplicable a PLC, DCS y señales remotas I/O.

Los segmentos H2 utilizan el estándar HSE (High Speed Ethernet) en configuración redundante (hasta 100 Mbit/s). Los dos protocolos Ethernet y Fieldbus se complementan mutuamente, estando incluidos en el estándar IEC 61158. Sin embargo, casi todos los protocolos con base Ethernet son propietarios, por lo que si bien los aparatos en la red Ethernet pueden interconectarse, usualmente no es posible su interoperabilidad. Esto es debido a que el estándar sólo especifica el cable, la dirección del puerto del hardware y del aparato y no incluye la aplicación ni las capas del usuario abiertas necesarias para conseguir una completa interoperabilidad en el circuito.

Foundation Fieldbus utiliza tres niveles o capas del sistema OSI (Open Systems Interconnect) de siete capas:

**Nivel 1 (Capa 1).** Nivel físico que proporciona una transmisión transparente de los datos entre los niveles (capas), recibe mensajes del *stack* de comunicaciones, los convierte en señales físicas, los adapta y coloca en el medio de transmisión y viceversa (IEC-1158-2, de 1993, e ISA-S.50.02, de 1992).

**Nivel 2 (capa 2).** Nivel de enlace de datos (niveles 2 y 7 del modelo OSI) que establece el enlace lógico (DDL), el control de acceso al medio (FAS) y la especificación de mensajes (FMS), incluyendo el control de flujo y de errores.

**Nivel 3 al 6 (cCapas 3 a 6).** Red, transporte, sesión, presentación, que son objeto de protocolo.

**Nivel 7 (capa 7).** Nivel de aplicación que contienen los servicios y regula la transferencia de mensajes entre las aplicaciones del usuario y los diferentes instrumentos.

**Nivel de usuario (capa usuario).** Dedicada y basada en bloques que representan las diferentes funciones de aplicación. Los bloques son:

**Bloque de recursos o RB (Resource Block),** características del dispositivo, fabricante, modelo y número de serie.

**Bloque de transductor o TB (Transducer Block),** tipo de sensor, fecha de calibración, estado del sensor, etc.

**Bloques de función o FB (Function Block),** con las estrategias de control del sistema (entrada analógica, control PID, alarmas, bias, ratio, selector de control, etc.) y gestión de alarmas, históricos y parámetros a acceder a nivel de las estaciones de operación.

Utilizan el dispositivo (DDS = Device Description Services) mediante un lenguaje (DDL = Device Description Language) que define los bloques de función. Cualquier ordenador que use el intérprete del DDS será capaz de operar con todos los parámetros definidos en el dispositivo, mediante la lectura de su descripción (DD = Device Description).

Estos bloques son típicamente AI (entrada analógica, Analog Input), AO (salida analógica, Analog Output), DI (entrada digital, Digital Input), DO (salida digital - Digital Output), PID (proporcional + integral + derivativo), INT (Integrador), SPG (generador de punto de consigna en rampa - Set Point Ramp Generator), Timer (temporizador), LLAG (adelanto - retardo, Lead Lag), y se encuentran dentro de la capa del usuario proporcionando funciones estándar como entradas y salidas analógica y digital, control PID, etc. Las funciones proporcionadas por estos bloques han sido definidas por los mayores fabricantes de equipos de automatización trabajando de forma coordinada, de modo que cada fabricante sabe que sus instrumentos serán intercambiables con los de los otros fabricantes.

La interoperabilidad es uno de los aspectos críticos satisfechos por FF. Esto quiere decir que se pueden interconectar y operar dispositivos de varios fabricantes en la misma red sin pérdida de funcionalidad, es decir, se puede sustituir un equipo de un

fabricante por otro pudiendo utilizar de inmediato las prestaciones extras que nos dé este segundo dispositivo.

La interoperabilidad se asegura gracias a la definición de los bloques de función estandarizados y a la tecnología de descripción de dispositivos. Se han creado perfiles de instrumentos estándar (caudalímetros, transmisores de caudal, nivel, temperatura, etc.) para pequeñas y medianas empresas, de tal manera que estas compañías fabricantes pueden definir su modelo de instrumento por referencia al perfil normalizado.

Algunos fabricantes que suministran instrumentos digitales que cumplen el estándar fieldbus son:

ABB, Dresser Valve Division, Endress + Hauser, Fieldbus Inc., Fisher Controls International, Inc, Fisher-Rosemount Systems, Inc., Foxboro (and Foxboro-Eckardt), Honeywell Industrial Automation & Control, MicroMotion Inc., Rosemount Inc., Yokogawa Electric Corporation, SAMSON AG, National Instruments, Yamatake Corporation.

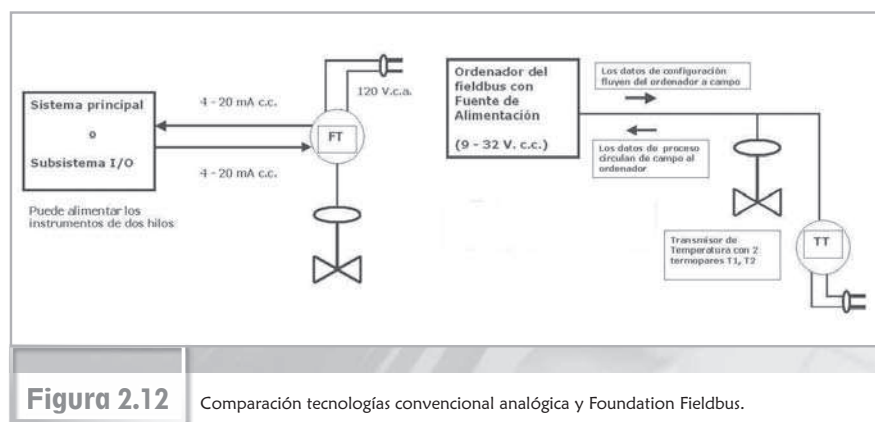
Como ejemplo, examinemos alguno de ellos:

- Transmisor de presión que cumple totalmente las especificaciones del protocolo Fieldbus Foundation y dispone de:
  - Bloques de funciones PID y analógico.
  - Linealización polinómica de nivel y caudal.
  - Datos de características electrónicas cargadas vía bus.
  - Compensación de los efectos de cambios de temperatura y presión en el sensor.
  - Compensación de la falta de linealidad del sensor.
  - Dispositivo de configuración de los ajustes del transmisor.
  - Diagnóstico de eventuales averías desde el panel o la sala de control, sin que el operador tenga que desplazarse a campo.
  - Exactitud 0,075% en modo analógico y 0,0625% en modo digital.
- Transmisor de temperatura que cumple totalmente las especificaciones del protocolo Fieldbus Foundation y dispone de:
  - Bloques de funciones PID y analógico, calcula la media, el máximo, el mínimo, la diferencia y otros.
  - Entradas de sondas de resistencia (Pt 100, ...), termopares (J, K, R, S), ohmios, mV.
  - Linealización de la temperatura.
  - Datos de características electrónicas cargadas vía bus.
  - Dispositivo que permite configurar los ajustes del transmisor y diagnosticar eventuales averías desde el panel o la sala de control, sin que el operador tenga que desplazarse a campo.
  - Comprobación continua de la resistencia del termopar a fin de detectar la condición "burnout" de rotura del termopar o del cable de compensación, generando una alarma en el panel y/o llevando la indicación de la temperatura al máximo /mínimo de la escala, y/o cambiando al termopar de reserva.

- Compensación de la unión fría.
- Protocolos de seguridad CENELEC, CSA, FM.
- Protección contra transitorios y rayos.
- Señal de salida 4 - 20 mA cc cc o digital
- Exactitud  $\pm 0,13$  °C con sensor de termorresistencia de Pt 100

### 2.5.4.3 Comparación de tecnologías de transmisión

Es interesante comparar la tecnología convencional analógica y la digital de fieldbus:



El control electrónico convencional está limitado a la señal 4 - 20 mA c.c que es transmitida por dos hilos para cada variable, por lo que esto aumenta el coste del cableado y además el coste de la puesta a punto de la instalación, ya que debe comprobarse individualmente cada par de hilos de cada variable.

La comunicación bidireccional digital permite la carga del software de configuración de los aparatos directamente a través del *fieldbus*, por lo cual la implantación de las últimas revisiones del estándar se puede efectuar sin desplazarse a campo y sin sustituir el aparato. Asimismo, las comunicaciones digitales eliminan la necesidad de la calibración periódica de la señal analógica de 4 - 20 mA c.c.

Otro ejemplo de las ventajas de la comunicación bidireccional es la válvula de control con su actuador. Mientras que en el actuador clásico se requieren más cables y más tarjetas y una considerable labor de puesta a punto para averiguar datos adicionales de la válvula, como su posición, el estándar FF dispone de bloques que permiten conocer datos de la válvula y su actuador, directamente y sin costo adicional.

Otro ejemplo es la medida de caudal con compensación de presión y temperatura, que queda reducida al uso de un solo instrumento multivariable.

Como ejemplo comparativo entre las dos técnicas, la transmisión analógica convencional y la de Foundation Fieldbus, en una industria química típica se comprobó que 60% de los viajes a planta para comprobar los transmisores analógicos

convencionales fueron innecesarios y que además, 20% de las comprobaciones de estos instrumentos repercutieron en cambios de calibración (cero y *span*). Luego, utilizando las comunicaciones digitales, se ahorra 80% de los viajes a planta, ya que el fabricante proporciona valores y procedimientos de calibración de sus instrumentos que incluyen la interacción con el operador para eliminar posibles errores. Mientras que el control electrónico analógico obliga a cambiar un instrumento (con el consiguiente paro del proceso) si hay sospechas de que funciona mal, el estándar FF incorpora 6 bloques de función que permiten diagnosticar el problema y evitar posiblemente el cambio del aparato.

Por todo ello, los aparatos FF cumplen la frase ideal de mantenimiento “instalar y olvidar” y además informan a proceso de los múltiples datos de la variable, aparte de permitir el diálogo entre instrumentos (válvula con transmisor).

Como en el mercado existen todavía muchos transmisores electrónicos analógicos, el vacío existente entre las dos tecnologías analógica y digital se llena con los estándares híbridos (tal como el protocolo HART).

## 2.6 Tabla comparativa de transmisores

Figura a continuación una tabla de comparación de características de los transmisores neumáticos, electrónicos convencionales, e inteligentes, estos últimos en las versiones de señal de salida de 4 - 20 mA c.c y de señal de salida digital.

Transmisor	Señal	Exactitud	Ventajas	Desventajas
Neumático	20-100 kPa, 0,2-1 bar, 3-15 psi	$\pm 0,5\%$	Rapidez	Aire limpio, Sencillo, No guarda información, Distancias limitadas, Mantenimiento caro, Sensible a vibraciones
Electrónico convencional	4-20 mA c.c	$\pm 0,5\%$ - $\pm 0,1\%$	Rapidez	Sensible a vibraciones, Derivas térmicas
Electrónico inteligente 4 - 20 mA cc	4-20 mA cccc, o digital	$\pm 0,2\%$	Mayor exactitud, Intercambiable, Estable, Fiable, Campo medida más amplio, Bajo coste mantenimiento	Lento (para variables rápidas puede dar problemas)
Electrónico inteligente señal digital	Digital	$\pm 0,1\%$	Mayor exactitud, Más estabilidad, Fiable, Autodiagnóstico, Comunicación bidireccional, Configuración remota, Campo medida más amplio, Bajo coste mantenimiento	Lento (para variables rápidas puede dar problemas), Falta normalización en las comunicaciones, No intercambiable con otras marcas

**Tabla 2.2**

Características de transmisores

## 2.7 Calibradores de transmisores

### 2.7.1 Generalidades

El aumento progresivo de los transmisores inteligentes en los procesos industriales ha propiciado la aparición de calibradores que puedan comunicarse a través de protocolos digitales estándar.

Estos calibradores reúnen en un solo aparato la generación y simulación de voltios, mA, termopares, sondas de resistencia, frecuencia, ohmios y presión. Automatizan los procedimientos de calibración y captura de datos, todo ello cumpliendo las normas de calidad ISO 9000, FDA, EPA y OSHA.

Disponen de medida, generación de señales de variables y medida/generación, lo que permite a los técnicos de mantenimiento la detección de averías, la calibración y el mantenimiento general de los instrumentos de la planta con un solo aparato.

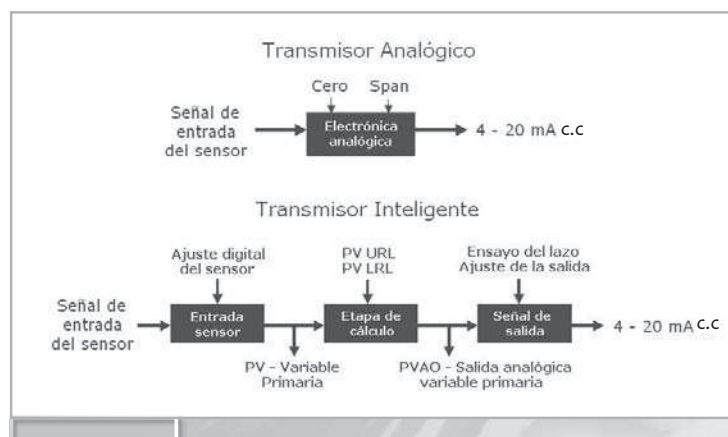
La calibración se realiza con el software interno del calibrador que muestra en pantalla cada paso para la generación de señales o para la medida. Las variables típicas son:

Medida de voltios cc, voltios ca, frecuencia, mA cc, ohmios, tTermopares.

Fuente de voltios cc, frecuencia, ohmios, mA cc, Ohms Measure, termopares.

En un instrumento digital se usa normalmente una interfase digital para fijar nuevamente el campo de medida.

En la figura 2.12 pueden verse los esquemas de los transmisores analógicos y digitales.



**Figura 2.13**

Transmisores analógicos e inteligentes (HART).

### 2.7.2 Calibradores de instrumentos HART

Los instrumentos con protocolo HART que sólo utilizan la señal de salida de 4 – 20 mA cc pueden calibrarse en forma análoga a la de un instrumento analógico. Pero si se usan señales digitales, deben asignarse digitalmente las señales de cero (0%) y *span* (100%) y no utilizar los tornillos o botones clásicos de cero (0%) y *span* (100%).

La calibración correcta de los instrumentos transmisores tipo HART requiere:

- El ajuste digital del sensor se realiza aplicando una variable conocida (temperatura o presión, por ejemplo) a la entrada del transmisor y ajustando la entrada para que la variable de proceso PV coincida con la entrada aplicada.
- El ajuste de la salida implica que el transmisor genere las señales de salida 4 y 20 mA cc. Estas señales se miden con un miliamperímetro de alta exactitud. Y después la parte de salida se ajusta de acuerdo con las medidas.

El calibrador general para transmisores con protocolo HART soporta los modelos de los fabricantes de transmisores HART, proporcionando:

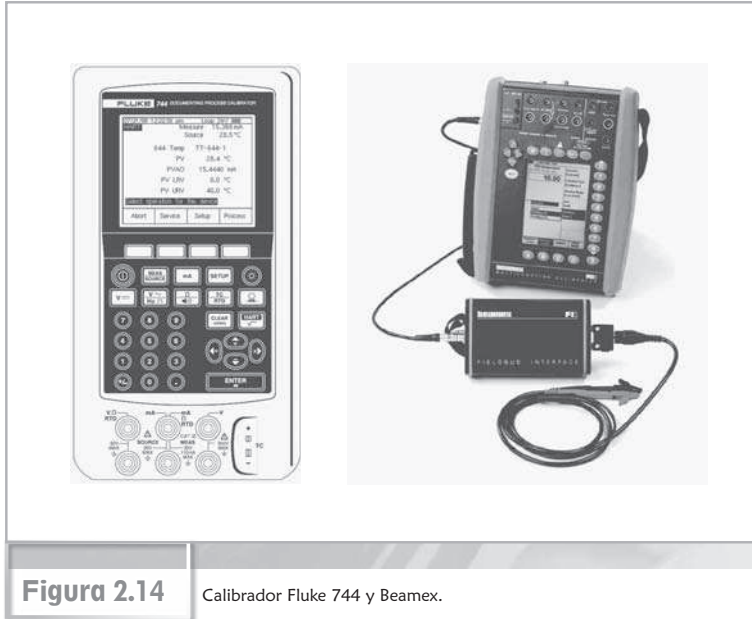
- Lectura de la variable de proceso (función PV de HART) y los valores digitales y analógicos (4 – 20 mA c.c) de salida del transmisor inteligente.
- Puede leer y escribir funciones de configuración HART para ajustes de campo a los puntos de regulación de la variable, el amortiguamiento y otros ajustes de alto nivel.
- Interroga al transmisor para determinar el tipo, fabricante, modelo e identificador comunicándose con los dispositivos HART.
- Vuelve a etiquetar los transmisores inteligentes leyendo y escribiendo en las etiquetas HART.
- No necesita caja externa ni instrumentos complementarios para la calibración y mantenimiento diario de instrumentos HART.
- Almacena los datos de calibración que son accesibles a través del puerto de comunicaciones.

Entre las marcas de calibradores figuran:

Modelos de calibradores	
Fabricante	Modelo
Altek	895 and 896
Rochester AccuPro Diamondä Plus Models	9002, 9004, 9005
Beamex	PC105, PC106, TC305
DH Instruments	PPC1/PPC2
Druck Limited	DPI 510, DPI 605
Druck/Unomat	MCX
Fluke	45 with Crystal MultiCal
	702 Documenting Process Calibrator
	743/743B Documenting Process Calibrator
	744 Documenting Process Calibrator
Beta	135, 235, 922, BetaGauge II, BetaFLEX
Transmation	160, 180, 195, 196, 1292, 1994

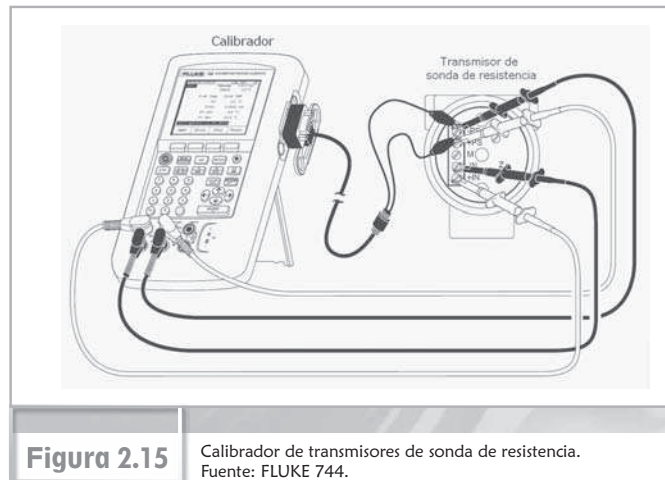
**Tabla 2.3** Modelos de calibradores

Marcha general de la calibración de los instrumentos inteligentes con comunicaciones tipo HART: El instrumento se conecta a través de un PC o de un comunicador de campo, explora todos los parámetros y carga el aparato en el sistema, asignando el código correcto y un esquema a cargar en el calibrador (por ejemplo, el 744 de Fluye). Es una operación rápida y precisa, ya que el instrumentista no se ve obligado a pasar al calibrador, vía teclado, todos los datos del instrumento. A continuación, el instrumento se calibra en banco utilizando los procedimientos preestablecidos y los resultados obtenidos son transferidos del calibrador a la base de datos del ordenador.

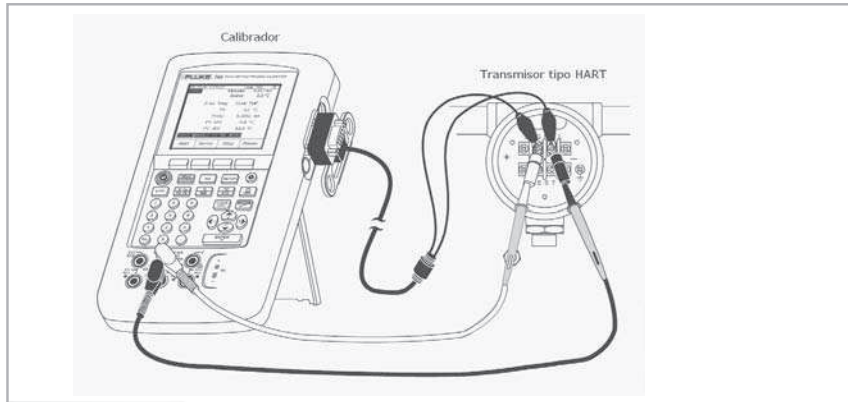


**Figura 2.14** Calibrador Fluke 744 y Beamex.

Los instrumentos convencionales (no inteligentes) pueden calibrarse de modo similar, pero es necesario ingresar manualmente en el ordenador los parámetros de cada instrumento. Los resultados de la calibración se graban en el PC, de modo que si más adelante desean revisarse esto puede hacerse, vía el teclado, del ordenador.



**Figura 2.15** Calibrador de transmisores de sonda de resistencia.  
Fuente: FLUKE 744.



**Figura 2.16**

Calibrador para verificación de comunicaciones de transmisores digitales, protocolo HART.  
Fuente: FLUKE 744.

Fabricante	Instrumento de presión	Instrumento de temperatura	Instrumento de Coriolis
ABB/Kent-Taylor	600T	658T	
ABB/Hartmann & Braun	Contrans P. AS800 Series		
Endress & Hauser	CERABAR S.	TMT 122	
	CERABAR M.	TMT 182	
	DELTABAR S.	TMT 162	
Foxboro Eckardt		TI/RTT20	
Foxboro/Invensys	I/A Pressure		
Fuji	FCX	FRC	
	FCXAZ		
Honeywell	ST3000	STT25T	
		STT25H	
Micro Motion			2000
			2000 IS
			9701
			9712
			9739
Moore Products		344	
Rosemount	1151	3044C	
	2088	644	
	3001C	3144	
	3051, 3051S	3244, 3144P	
Siemens	SITRANS P DS		
	SITRANS P ES		
SMAR	LD301	TT301	
Viatran	I/A Pressure		
Wika	UNITRANS	T32H	
Yokogawa	EJA	YTA 110, 310 y 320	

**Tabla 2.4**

Calibrador de transmisores digitales, protocolo HART.  
Fuente: FLUKE 744.

### 2.7.3 Calibradores de instrumentos Fieldbus

Combinan un calibrador multifunción con un configurador de fieldbus. Incluye la lectura de la salida digital del transmisor, el cambio de configuraciones de los transmisores y el ajuste del transmisor.

Entre sus características figuran:

- Calibra transmisores Fieldbus H1 o Profibus PA.
- Calibra y configura el fieldbus en una sola unidad.
- Efectúa calibraciones traceables.
- Los resultados de la calibración se documentan automáticamente.
- Es utilizable para otro tipo de calibraciones.

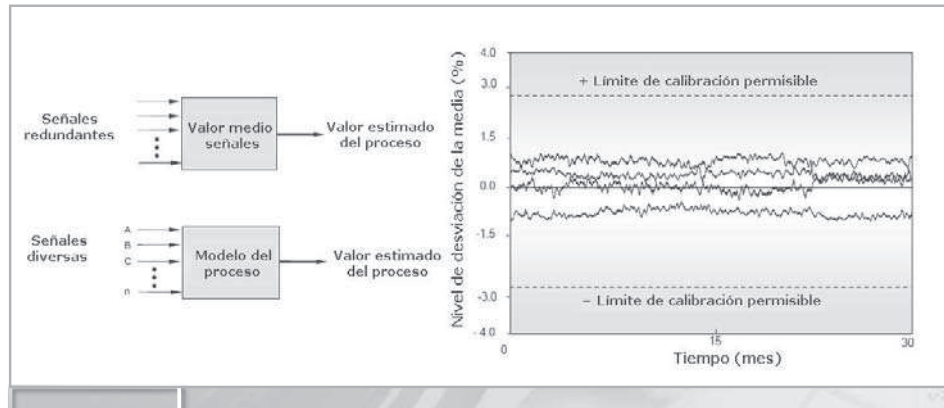


**Figura 2.17**

Calibrador Fieldbus.  
Fuente: Beamex.

## 2.8 Calibración y monitorización de instrumentos transmisores en línea

En los procesos que por sus características no pueden detenerse a voluntad sino que sólo es posible intervenir durante los paros y las puestas en marcha de la planta, (central nuclear, refinería, etc.), es vital saber si los instrumentos cumplen las condiciones de aceptación, pues puede ocurrir que los productos se fabriquen fuera de normas de calidad, debido a la descalibración gradual de los aparatos, y que se actúe cuando ya es demasiado tarde con posible salida de la zona de seguridad en el caso de una central nuclear y con pérdidas de la producción de una semana en el caso de una refinería.

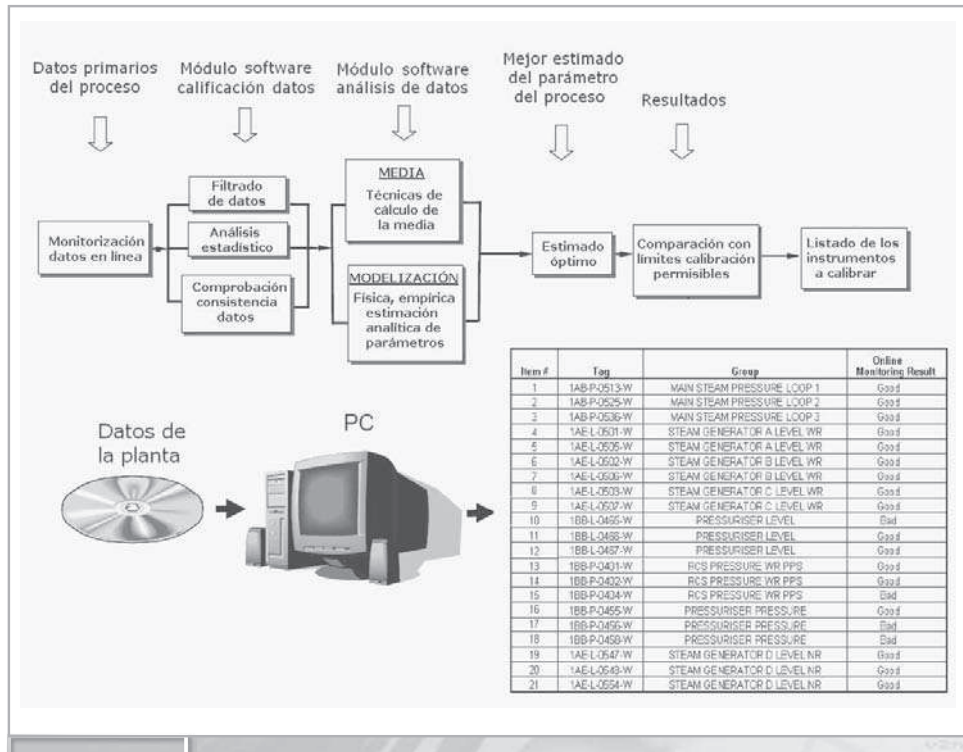
**Figura 2.18**

Criterios de aceptación en línea de transmisores de presión en una central nuclear.  
Fuente: AMS.

Por consiguiente, es necesario determinar si hay que calibrar los instrumentos. Se obtiene el valor medio de las señales normales del proceso y se compara con señales diversas generadas en un modelo del proceso, para identificar la deriva del proceso con relación al estimado por el modelo. Si se identifica la deriva, se toma la decisión de calibrar el sensor (figura 2.18). Conviene señalar que las abscisas de la curva están dadas en meses debido a que la descalibración de los instrumentos transmisores inteligentes tiene lugar al cabo de años. Se observa en la figura que ninguno de los instrumentos ha experimentado una descalibración significativa, por lo que no es necesario recalibrarlos.

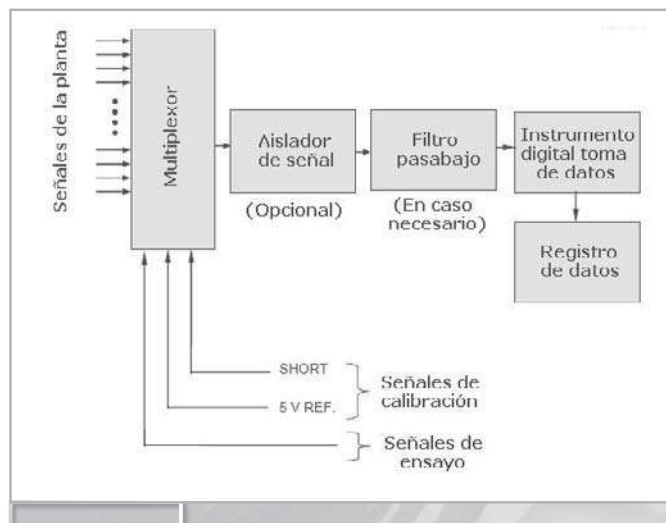
Si los datos anteriores indican que uno o varios instrumentos deben recalibrarse en línea, los datos del ordenador de la planta obtenidos por muestreo periódico de las variables del proceso y almacenados en el ordenador van a permitir que el software de calibración pueda calificarlos, analizarlos, comparar los resultados del análisis con los criterios de aceptación y proporcionar un diagnóstico con gráficos, tablas e informes (figura 2.19), donde figura como más importante una columna en la que se acepta el transmisor (*good*) o se rechaza (*bad*).

Identificados los transmisores descalibrados, estos se calibran mediante un sistema de adquisición de datos dedicado (figura 2.17) o mediante el propio ordenador con el software adecuado.



**Figura 2.19**

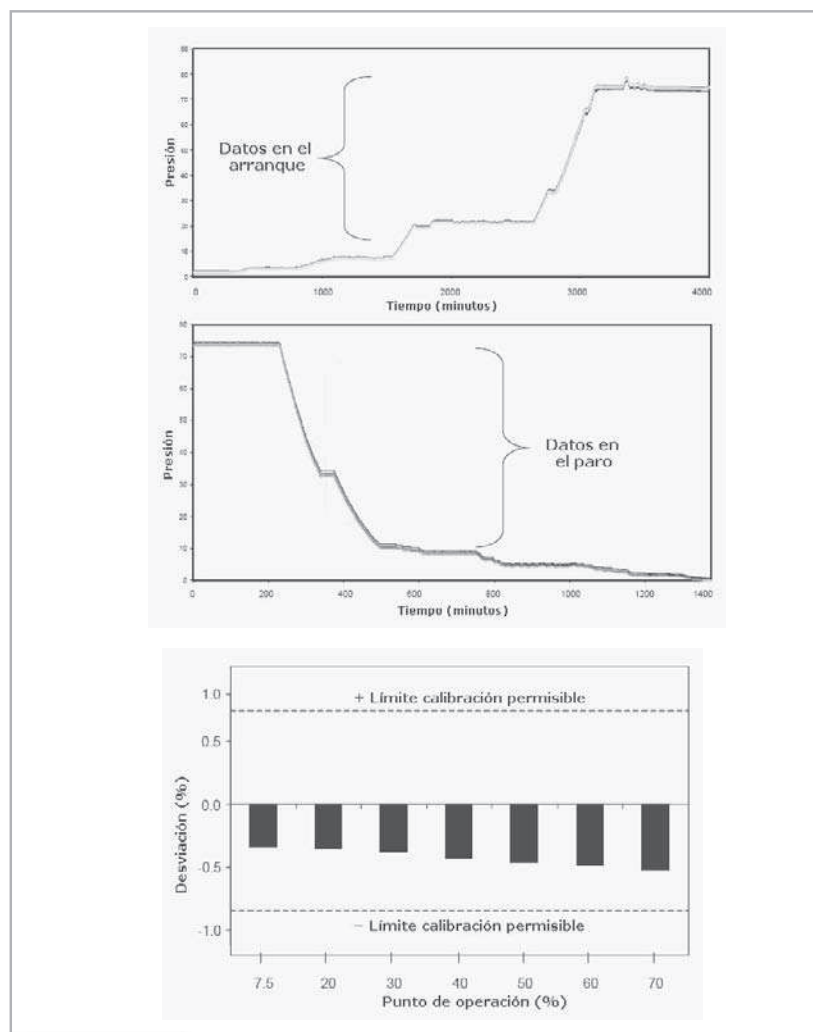
Calibración en línea de un transmisor de presión en una central nuclear.  
Fuente: AMS.



**Figura 2.20**

Esquema de calibración en línea.  
Fuente: AMS.

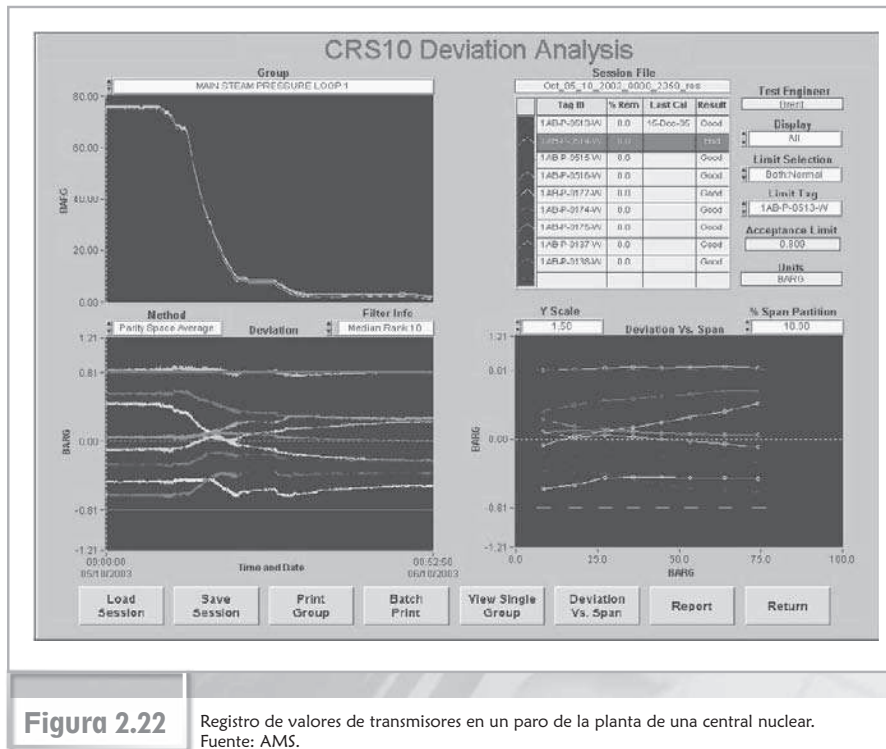
La calibración automática comentada se refiere sólo al punto de trabajo del proceso, ya que en raros casos el responsable de fabricación permitirá la entrada de otras señales del campo de medida. Hacerlo equivaldría a desestabilizar el proceso y probablemente obtener productos defectuosos. Por tanto, los datos de la variable que sean suficientes para tomar la decisión de calibrar o no el instrumento sólo podrán obtenerse en la puesta en marcha y en el paro de la planta. En la figura 2.21 pueden verse los datos registrados en el arranque y el paro del proceso de 9 transmisores de una central nuclear y la deriva de uno de los transmisores en 7 puntos dentro del campo de medida del instrumento.



**Figura 2.21**

Datos de arranque y paro y deriva de un transmisor de presión en una central nuclear. Fuente: AMS.

En la figura 2.22 puede verse un registro de los valores de los transmisores durante un paro de la planta.



**Figura 2.22**

Registro de valores de transmisores en un paro de la planta de una central nuclear.  
Fuente: AMS.

La ventaja del método estriba en que identifica en tiempo real los problemas de calibración, los efectos del proceso y de la instalación en la calibración y previene la calibración innecesaria del instrumento, alargando más la frecuencia de las operaciones de calibración con el ahorro económico correspondiente.

El método puede aplicarse a presión, caudal, nivel, temperatura y otras variables.



## Capítulo

# 3

# Calibración de instrumentos de medición de variables

## 3.1 Generalidades

En este capítulo se describirán los calibradores y sistemas de calibración elementales, que el propio usuario puede construirse, y los modelos comerciales que han sido muy bien estudiados por los fabricantes para satisfacer las necesidades de los usuarios desde las más simples a las más complejas. Se describirán también los calibradores patrón utilizados por la normas NIST.

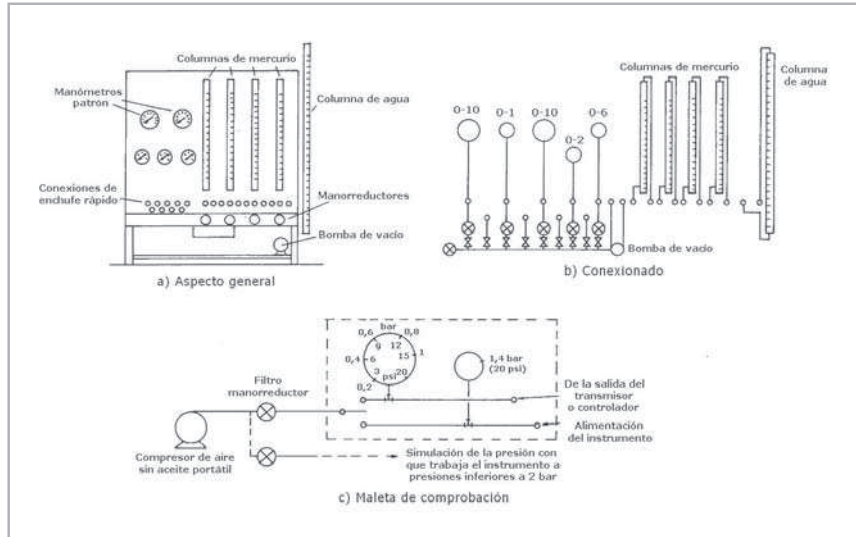
Se entiende que los sistemas de calibración muy especiales referentes a los transmisores ya han sido descritos en el capítulo anterior.

## 3.2 Calibradores simples universales neumáticos y electrónicos

### 3.2.1 Calibradores neumáticos

En el taller de instrumentos de una planta típica es de uso común el banco neumático de prueba de instrumentos.

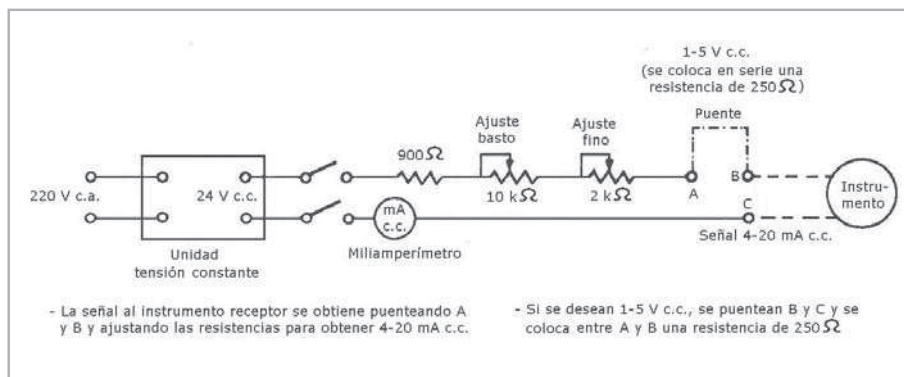
La presión del aire de instrumentos (6 bar - 600 kPa – 87 psi) es suficiente para simular presiones, vacíos y presiones diferenciales, útiles para la calibración de los instrumentos clásicos de presión, nivel y caudal. La maleta de comprobación portátil de la figura 3.1 permite realizar calibraciones puntuales en la propia planta.



**Figura 3.1** Banco neumático de prueba de instrumentos.

### 3.2.2 Calibradores electrónicos

El sistema de calibración debe ser capaz de generar y recibir señales de 4-20 mA c.c., 1-5 mA cc, 10-50 mA cc, 0-5 mA cc, 0-20 mA c.c., 1-5 V cc y de simular las impedancias externas del circuito asociado con el instrumento (tabla 3.1). No obstante hay que señalar que la señal estándar utilizada es la de 4 – 20 mA c.c.



**Figura 3.2** Esquema sencillo para la calibración de instrumentos electrónicos.

Señal	Impedancia interna (ohm)	Impedancia de carga total (ohm)	Alimentación (V.cc)
4 - 20 mA cc	250	1200	24
1 - 5 mA cc	1000	4800	24
10 - 50 mA cc	100	1300	65
0 - 5 mA cc	1000	4800	
0 - 20 mA cc	250	1200	24
1 - 5 V cc	250 que genera	4 - 20 mA cc	24
0 - 10 mV cc	2 que genera	1 - 5 mA cc	24
10 - 50 mV cc	10 que genera	1 - 5 mA cc	24

**Tabla 3.1**

Impedancias características de los instrumentos electrónicos.

### 3.2.3 Calibradores multifunción (presión y temperatura)

Reúnen en un solo instrumento la medición y generación de mA, voltios, temperatura (sondas de resistencia y termopares), frecuencia, resistencia (ohm) y presión. La presión dispone de varios márgenes de trabajo gracias a módulos opcionales de presión.



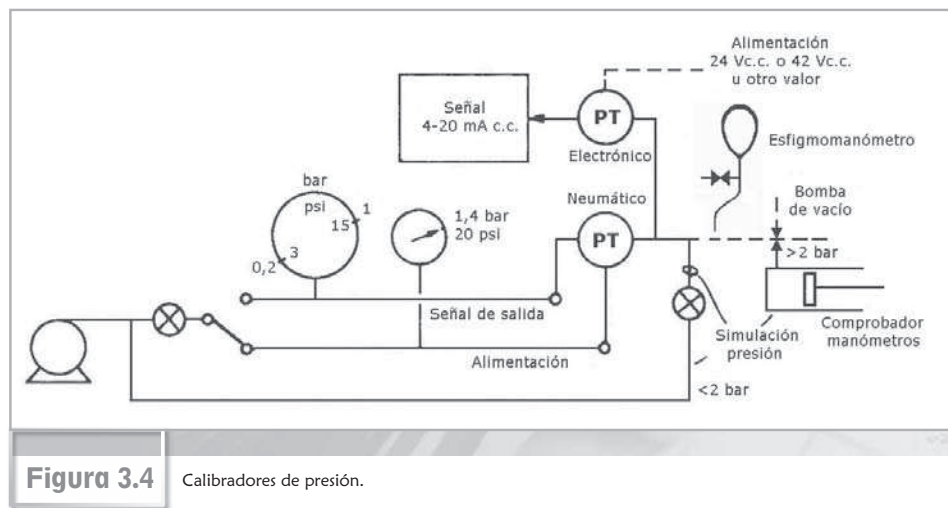
**Figura 3.3**

Calibrador multifuncional (mA, voltios, temperatura -sondas de resistencia y termopares-, frecuencia, ohmios y presión). Fuente: Fluke.

### 3.3 Calibradores de presión

#### Esquema simple

El esquema simple para la calibración de los instrumentos de presión se muestra en la figura 3.4, dibujada para un transmisor neumático o electrónico y con la presión simulada conseguida por medio de una bomba de vacío, o un compresor o un comprobador de manómetros o un esfigmomanómetro.



**Figura 3.4** Calibradores de presión.

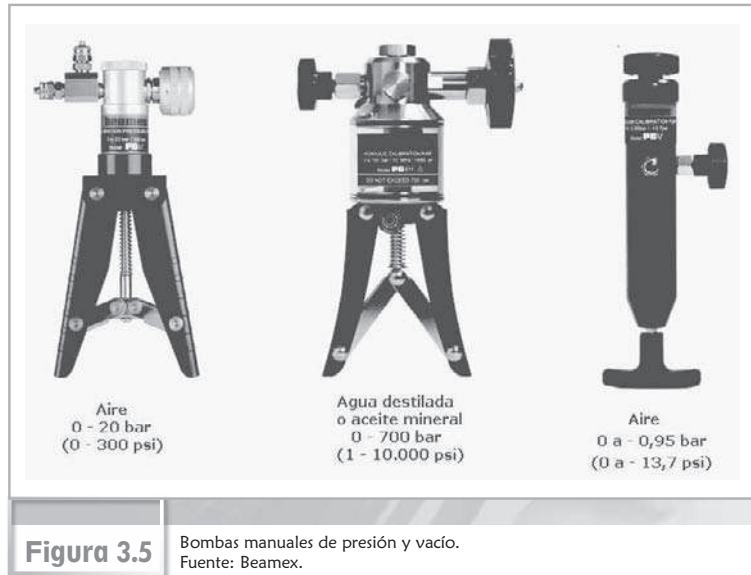
Los valores de presión abarcan un vacío de 0 – 760 mm Hg y márgenes de presiones de 0 – 1 bar, 0 – 2 bar, 0 – 6 bar y 0 – 200 bar o superior.

Las *maletas de calibración neumáticas* consisten en un pequeño compresor de aire sin aceite (aros de grafito) apto para alimentar dos o tres instrumentos a la presión mínima de 2 kg/cm<sup>2</sup>, a fin de acoplarle un manorreductor que proporcione la presión de alimentación de 1,4 kg/cm<sup>2</sup>.

Esta maleta de comprobación permite calibrar los instrumentos neumáticos de campo o de panel o bien simular las presiones obtenidas en los instrumentos de nivel de diafragma o en bajas presiones. Si no se dispone de ella, puede utilizarse como fuente de aire la propia de la planta y emplear para la calibración manómetros patrón o columnas de mercurio.

Otro sistema, utiliza unas *bombas manuales* que mediante bombeo con la mano consiguen márgenes de presión de 0 – 20 bar (0 – 2000 kPa) (0 – 300 psi) para aire, 0 – 700 bar (0 – 70.000 kPa) (0 – 10.000 psi) para agua destilada o aceite hidráulico mineral y un vacío de 0 a – 0,95 bar (0 a -95 kPa) (0 a -13,7 psi) para aire.

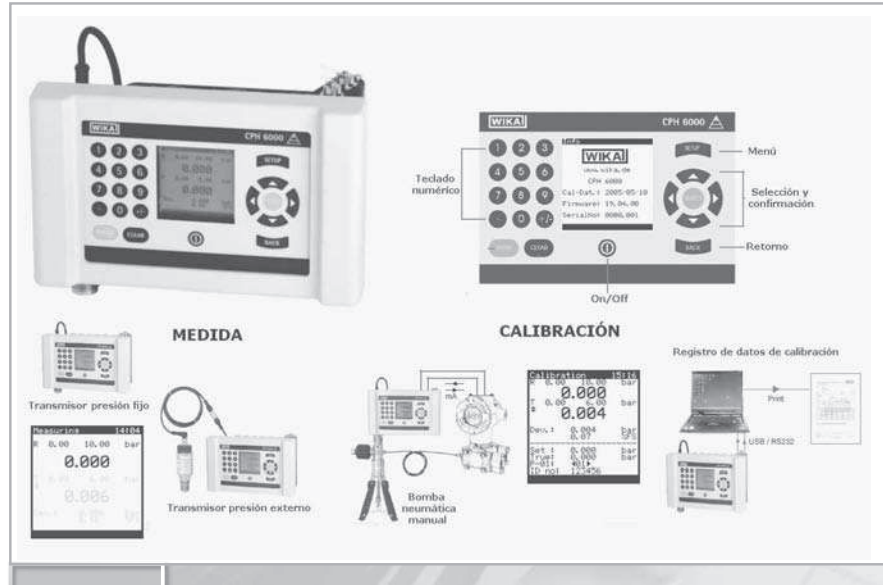
Disponen de un manorreductor para ajuste fino y de una conexión para un manómetro/vacuómetro patrón. Se caracterizan por un bajo valor de la incertidumbre del orden de  $\pm 0,015$  de toda la escala.



El *calibrador digital de presión neumático* e hidráulico puede trabajar entre 25 kPa a 100 MPa (0,25 – 1.000 bar) y puede medir también 0 a 20 mA, 0 a 1, 0 a 5, y 0 a 10 V cc. Dispone de:

- Alimentación de 24 V cc a transductores, transmisores y lazo de corriente.
- Interfase de comunicación USB y RS232.
- Incertidumbre total = 0,025% del intervalo del rango.
- Compatible con diversos fluidos como líquido para frenos y Skydrol.
- Memoria para registro de lecturas del mensurando.
- Bombas neumáticas e hidráulicas disponibles de opción.
- Rango de temperatura compensada = 0 a 50 °C.
- Temperatura del medio de presión = -20 a 80 °C.

Los módulos de presión que emplean los calibradores multifuncionales tienen una incertidumbre de  $\pm 0,050$  dentro de un intervalo de confianza de 95%.



**Figura 3.6**

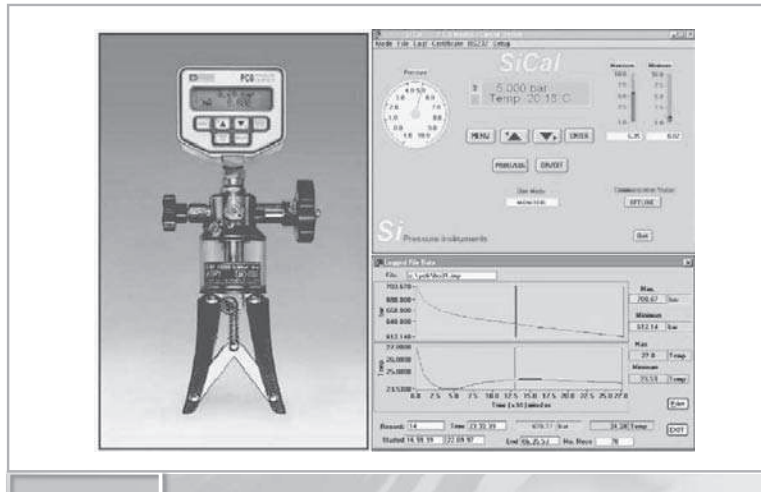
Comprobador de manómetros digital neumático e hidráulico.  
Fuente: WIKA.



**Figura 3.7**

Calibrador para presión y temperatura.  
Fuente: Heisse.

El software ayuda en la calibración cuando se requiere controlar remotamente el calibrador, vía un cable de conexión RS-232. El usuario puede representar los datos en tiempo real en forma de indicación analógica, digital, en una escala graduada como si fuera un manómetro o en una forma gráfica (figura 3.8).

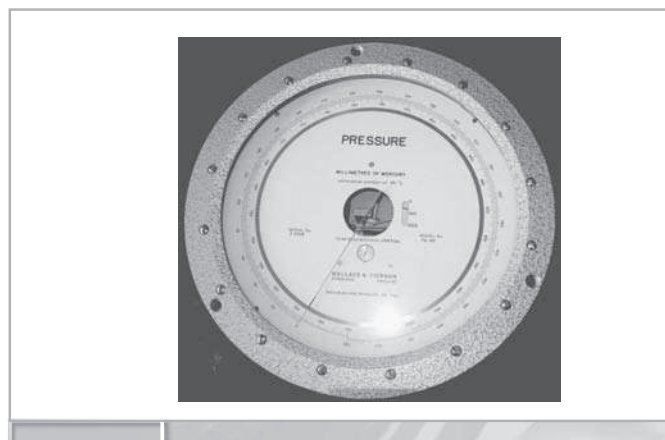


**Figura 3.8**

Calibrador de presión con software de datos vía RS-232.  
Fuente: SiCal.

Los manómetros patrón son manómetros de alta exactitud del orden del  $\pm 0.2\%$  de toda la escala. Tienen las siguientes características:

- Dial con superficie especular con lectura por coincidencia del índice y de su imagen.
- Finura del índice y de las graduaciones de la escala.
- Compensación de temperatura con un bimetálico.
- Tubo Bourdon de varias espiras.
- Se consigue aún mayor exactitud (0,1%) situando marcas móviles para cada incremento de lectura del instrumento.



**Figura 3.9**

Manómetro de precisión.  
Fuente: Wallace & Tiernan.

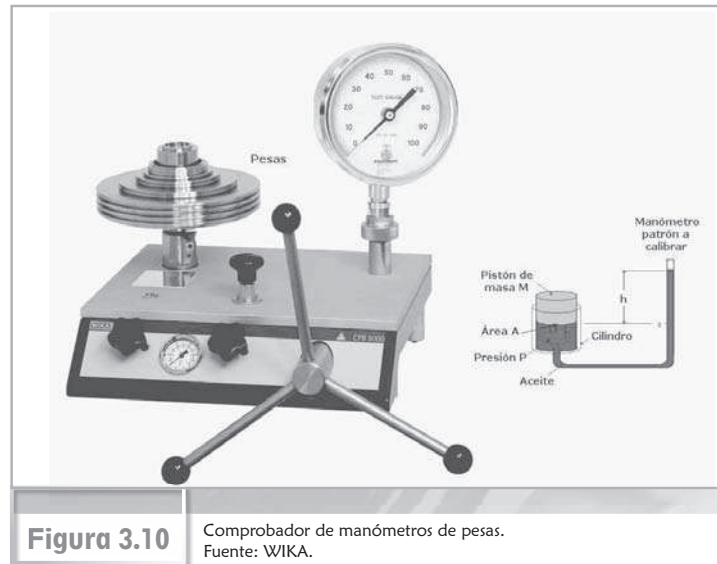
También pueden utilizarse como aparatos patrón de presión, los transmisores digitales inteligentes por la exactitud elevada que tienen, del orden de  $\pm 0.2\%$ .

#### Medidor de peso muerto

Es un patrón primario que consiste en una bomba de aceite o de fluido hidráulico con dos conexiones de salida, una conectada al manómetro patrón y la otra a un cuerpo de cilindro dentro del cual desliza un pistón de sección calibrada que incorpora un juego de pesas, lo que permite obtener márgenes muy variados. La comprobación se lleva a cabo accionando la bomba hasta levantar el pistón que soporta las pesas calibradas. Con la mano se hace girar este pistón. Su giro libre indica que la presión es la adecuada, ya que el conjunto pistón-pesas está flotando sin roces.

Las características principales de estos calibradores son:

- Pistones y cilindros de carburo de tungsteno (intervalo calibración hasta 5 años).
- Rangos de presión neumática de -100 kPa (vacío) a 10 MPa de presión relativa (-1 bar de vacío hasta 100 bar de presión relativa).
- Rangos de presión hidráulica desde 20 kPa a 400 MPa de presión relativa (0,2 bar hasta 4.000 bar de presión relativa).
- Incertidumbre total = 0,010% ó 0,015% del valor de la presión generada.



#### Patrón de presión

- Patrón de baja presión de 175 kPa (1,75 bar) a 7 MPa (70 bar). Incertidumbre expandida – coeficiente de cobertura  $k = 2$ .
- 175 kPa a 350 kPa =  $\pm 3,3 \cdot 10^{-5}$  de la lectura

- 350 kPa a 1.750 kPa =  $\pm 2,6 * 10^{-5}$  de la lectura
- 1,75 MPa a 7 MPa =  $\pm 3,8 * 10^{-5}$  de la lectura



**Figura 3.11** Patrón de baja presión utilizando gas.  
Fuente: CENAM.

La presión se logra al presurizar el gas, el cual hace flotar un pistón que soporta una masa determinada, lo que produce una presión calculada.

**Exactitud de los manómetros industriales**

Es de interés conocer la exactitud de los manómetros utilizados en la industria. La tabla 3.2 indica algunas de sus características referidas al modelo y a su exactitud.

Manómetros tipo Bourdon. Norma ASME B40.1							
Grado	Exactitud (% escala)	% error admisible del campo de medida (span)			Nº mínimo recomendado de puntos de ensayo	Diámetro escala	Observaciones
		Inferior (25%)	Medio (50%)	Superior (25%)			
4A	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,1\%$	10	8,5" a 16"	Manómetros de laboratorio. Manejar cuidadosamente para no alterar la exactitud.
3A	$\pm 0,25\%$	$\pm 0,25\%$	$\pm 0,25\%$	$\pm 0,25\%$	5	4,5" a 8,5"	No tienen compensación de temperatura
2A	$\pm 0,50\%$	$\pm 0,50\%$	$\pm 0,50\%$	$\pm 0,50\%$	5	4,5" a 6,5"	Industria petroquímica. No tienen compensación de temperatura
1A	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$	5	2,5" a 8,5"	Manómetros industriales de alta calidad

**Tabla 3.2** Características de manómetros industriales Norma ASME B40.1

Manómetros tipo Bourdon. Norma ASME B40.1							
A	± 1% a la mitad de la escala y ± 2% en los extremos	± 2%	± 1%	± 2%	5	2,5" a 6"	Manómetros industriales
B	± 2% a la mitad de la escala y ± 3% en los extremos	± 3%	± 2%	± 3%	3	1,5 a 4,5"	Manómetros comerciales

**Tabla 3.2**  
continuación

Características de manómetros industriales Norma ASME B40.1

Manómetros tipo Bourdon. Norma ASME B40.7			
Grado	% error admisible		Nº mínimo recomendado de puntos de ensayo
5A	± 0,05%	del span	15
4A	± 0,1%	del span	10
3A	± 0,25%	del span	5
2A	± 0,5%	del span	5
A	± 1%	del span	5
B	± 2%	del span	3
5AR	± 0,05%	de la lectura	15
4AR	± 0,1%	de la lectura	10
3AR	± 0,25%	de la lectura	5
2AR	± 0,5%	de la lectura	5
AR	± 1%	de la lectura	5
BR	± 2%	de la lectura	3

**Tabla 3.3**

Manómetros tipo Bourdon. Norma ASME B40.7

En la tabla 3.4 pueden verse las calibraciones típicas de presión que pueden realizar los centros acreditados.

Calibraciones en el Laboratorio		
MAGNITUD	CAMPO DE MEDIDA	INCERTIDUMBRE
Presión Neumática Relativa	3'5 kPa <= P <= 70 kPa	68·10 <sup>-6</sup> ·P + 0'6 Pa
	70 kPa <= P <= 700kPa	57·10 <sup>-6</sup> ·P + 0'6 Pa
	700 kPa <= P <= 6'7MPa	60·10 <sup>-6</sup> ·P + 6 Pa
	6'7 kPa <= P <= 50 MPa	75·10 <sup>-6</sup> ·P + 60 Pa
Presión Absoluta	3'5 kPa <= P <= 70kPa	68·10 <sup>-6</sup> ·P + 0'6 Pa
	70 kPa <= P <= 700 kPa	57·10 <sup>-6</sup> ·P + 0'6 Pa
	700 kPa <= P <= 7MPa	60·10 <sup>-6</sup> ·P + 6 Pa
Presión Hidráulica Relativa	100 kPa <= P <= 2'5MPa	60·10 <sup>-6</sup> ·P + 60 Pa
	2'5 MPa <= P <= 6'1MPa	60·10 <sup>-6</sup> ·P + 60 Pa
	16 kPa <= P <= 70 kPa	58·10 <sup>-6</sup> ·P + 60 Pa
		P = Presión leída
Calibraciones "in situ"		
MAGNITUD	CAMPO DE MEDIDA	INCERTIDUMBRE
Presión Neumática Relativa	3'5 kPa <= P <= 2 MPa	2 · 10 <sup>-4</sup> ·P + 0'33 kPa
	2 MPa <= P <= 7 MPa	2'7·10 <sup>-6</sup> ·P + 0'92 kPa
Presión Neumática Relativa	0'1MPa <=P <= 70MPa	6 · 10 <sup>-5</sup> ·P + 26 KPa
		P = Presión leída
1 kPa = 0,01 bar,    1 Mpa = 10 bar		

**Tabla 3.4**

Calibraciones típicas de presión de centros acreditados  
Fuente: Termocal

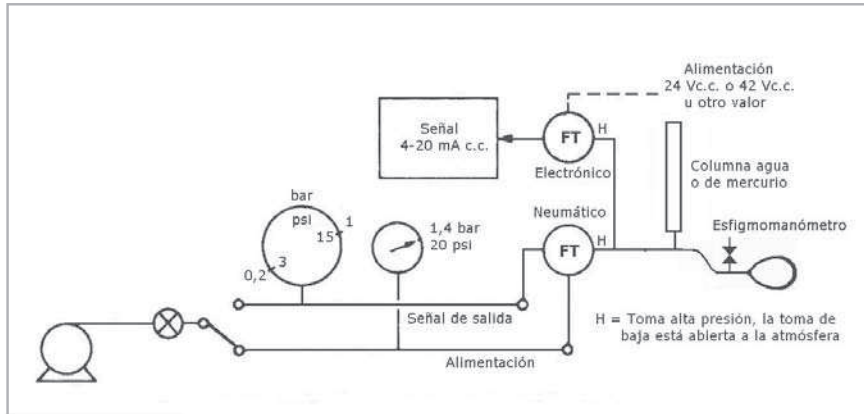
### 3.4 Calibradores de caudal

#### 3.4.1 Instrumentos de presión diferencial

##### Esquema simple

El esquema simple para la calibración de los instrumentos de presión diferencial se muestra en la figura 3.12, dibujada para un transmisor neumático o electrónico y con la presión generada por medio de una bomba de vacío, o un compresor o un esfigmomanómetro o la fuente de aire de la planta. La indicación viene dada por una columna de agua o de mercurio o por un sensor de baja presión.

Por ejemplo, en un transmisor de presión diferencial de campo de medida de 2.500 mm. cda (columna de agua) se conectará la toma de alta presión a un tubo con agua hasta una altura de 2,5 m y la toma de baja presión a la atmósfera, para simular 100% de la variable (o bien a manómetros patrón). Para valores intermedios de calibración será necesario convertir las lecturas de caudal leídas en el instrumento en los valores de la presión diferencial introducidos en la toma de alta del aparato.



**Figura 3.12** Esquema de calibración de instrumentos de presión diferencial.

En la tabla 3.5 se da la correspondencia entre estos límites.

Presión diferencial (lineal)	Caudal (escala cuadrática 0 - 10)	Caudal (escala cuadrática 0 - 100)	0,2-1 bar (cuadrática)	3-15 psi (cuadrática)	4 - 20 mA cc (cuadrática)
0	0	0	0,2	3	4
1	1	10	0,28	4,2	5,6
4	2	20	0,36	5,4	7,2
9	3	30	0,44	6,6	8,8
10	3,2	32	0,456	6,84	9,12
16	4	40	0,52	7,8	10,4
20	4,5	45	0,56	8,4	11,2
25	5	50	0,6	9	12
30	5,5	55	0,64	9,6	12,8
36	6	60	0,68	10,2	13,6
40	6,3	63	0,704	10,56	14,08
49	7	70	0,76	11,4	15,2
50	7,1	71	0,768	11,52	15,36
60	7,7	77	0,816	12,24	16,32
64	8	80	0,84	12,6	16,8
70	8,4	84	0,872	13,08	17,44
75	8,7	87	0,896	13,44	17,92
80	8,9	89	0,912	13,68	18,24
81	9	90	0,92	13,8	18,4
90	9,5	95	0,96	14,4	19,2
100	10	100	1	15	20

**Tabla 3.5** Relaciones presión diferencial - caudal (placa-orificio).

En un instrumento de presión diferencial inteligente la configuración se efectúa seleccionando los parámetros de operación (número de código, valores del campo de medida, constante de tiempo de amortiguamiento y las unidades de ingeniería. La comprobación de la calibración (que ya ha sido efectuada en fábrica y no requiere ajustes) puede realizarse aplicando una presión estándar en forma parecida a la descrita en los transmisores inteligentes de presión. En las placas-orificio es necesario revisar de nuevo el cálculo de la placa.

Para asegurar la máxima exactitud en la medida, deben instalarse transmisores de presión y temperatura que compensen la medida del instrumento de caudal. Por ejemplo, en la medida de caudal de gas, un error de 0,26 bar genera un error de 0,5% en el caudal, mientras que un error de 2 °C da lugar a un error en el caudal de 0,4%.

De acuerdo con la norma ISO 5167, la incertidumbre en el caudal de una placa orificio es:

$$\frac{\delta qm}{qm} = \sqrt{\left(\frac{\delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4}\right) * \left(\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4}\right) * \left(\frac{\delta d}{d}\right)^2 + \frac{1}{4} * \left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}\right)^2 + \frac{1}{4} * \left(\frac{\delta \Delta \rho_1}{\Delta \rho_1}\right)^2}$$

El *coeficiente de sensibilidad* de la medida, es decir, la relación matemática entre un parámetro de influencia y su efecto en el resultado de la medida es el siguiente:

- Beta (coeficiente de la placa – relación entre el diámetro del orificio y el de la tubería) = 50%
- Presión diferencial = 25%
- Densidad del fluido (composición, presión y temperatura) = 25%

### 3.4.2 Rotámetros

Los rotámetros no pueden calibrarse, sólo pueden comprobarse, exceptuando la parte transmisora cuando la llevan incorporada.

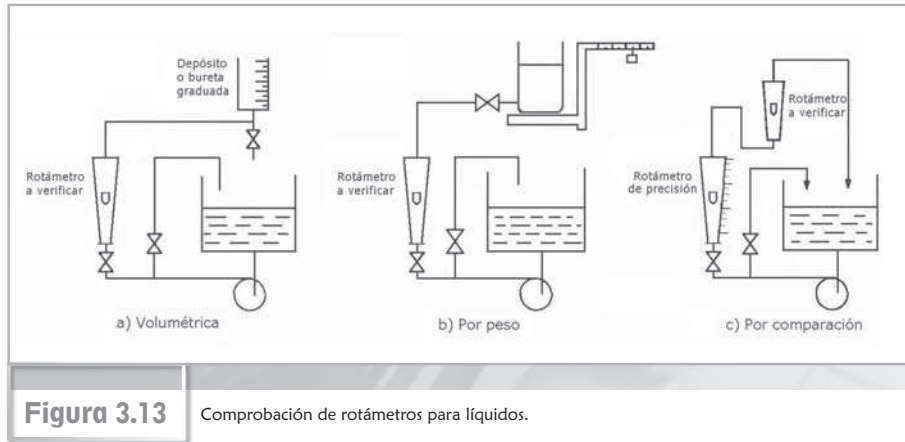
La prueba volumétrica (figura 3.13a) está basada en la circulación del líquido de calibración (agua) a través del rotámetro a comprobar, hacia un depósito o bureta de precisión graduada. Se registra el tiempo de llenado con un cronómetro y se calcula el caudal por división del volumen de la bureta por el tiempo transcurrido.

La relación entre el caudal de líquido de un rotámetro y su equivalente en agua para un flotador de acero inoxidable 316 de densidad 8,04 viene dado por la expresión:

$$Q_{\text{liquido}} = Q_{\text{agua}} * \sqrt{\frac{8,0 - r_{\text{liquido}}}{r_{\text{liquido}} * (8,0 - 1)}}$$

$$\text{Siendo: } Q_{\text{agua}} = \text{Caudal equivalente agua} = \frac{\text{Volumen deposito o bureta}}{\text{Tiempo de llenado}}$$

$$\rho_{\text{liquido}} = \text{Peso específico del fluido del proceso s/placa de características}$$



El valor  $Q_{\text{líquido}}$  obtenido debe coincidir con la posición que el flotador ha adoptado durante la experiencia.

En el método gravimétrico (figura 3.13 b) se llena de agua un depósito de peso conocido puesto sobre una báscula y con el flotador del rotámetro en una posición constante (caudal constante), registrándose el tiempo transcurrido con un cronómetro de precisión. La fórmula a aplicar es la misma que en el método volumétrico, pero expresando los caudales en peso.

$$W_{\text{líquido}} = W_{\text{agua}} * \sqrt{\frac{8,0 - r_{\text{líquido}}}{r_{\text{líquido}} * (8,0 - 1)}}$$

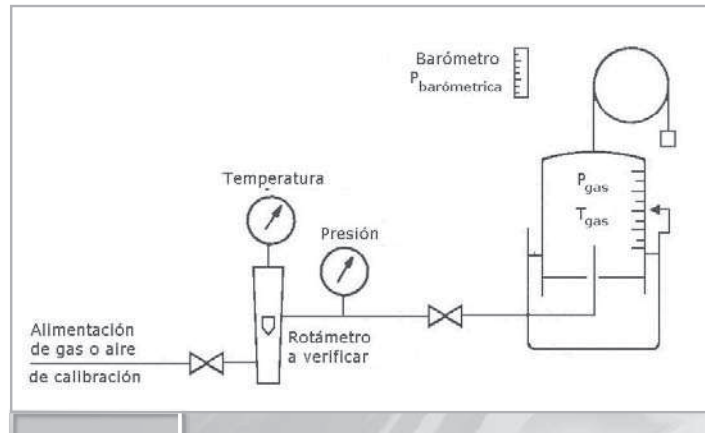
$$\text{Siendo: } W_{\text{agua}} = \text{Peso equivalente en agua} = \frac{\text{Peso neto dispositivo}}{\text{Tiempo de llenado}}$$

$$\rho_{\text{líquido}} = \text{Peso específico del fluido del proceso s/placa de características}$$

Y al igual que en el método anterior, debe coincidir  $W_{\text{líquido}}$  con el valor marcado por la posición del flotador.

En el método de comparación (figura 3.13c) las lecturas del rotámetro patrón y del que se verifica deben ser iguales.

Los rotámetros para gases se verifican utilizando un gasómetro volumétrico (figura 3.14). El gas de calibración (aire, nitrógeno) fluye a través del rotámetro en condiciones controladas de presión y temperatura (usualmente 15 °C y presión atmosférica) y eleva la campana invertida del gasómetro en un tiempo determinado medido con un cronómetro.



**Figura 3.14** Gasómetro volumétrico.

Utilizando aire como gas de calibración, la fórmula correspondiente es:

$$Q_{gas} (Nm^3/min) = Q_{aire} (Nm^3/min) \sqrt{\frac{1}{\rho_{gas}} * \frac{288}{T} * \frac{P}{760} * \frac{\rho_{flotador}}{8,0}}$$

en la que:

$\rho_{gas}$  = densidad del gas referida al aire a 15 °C y 760 mm Hg.

T = temperatura absoluta del gas (273 + t)

P = presión absoluta del gas en mm Hg. (p + 760)

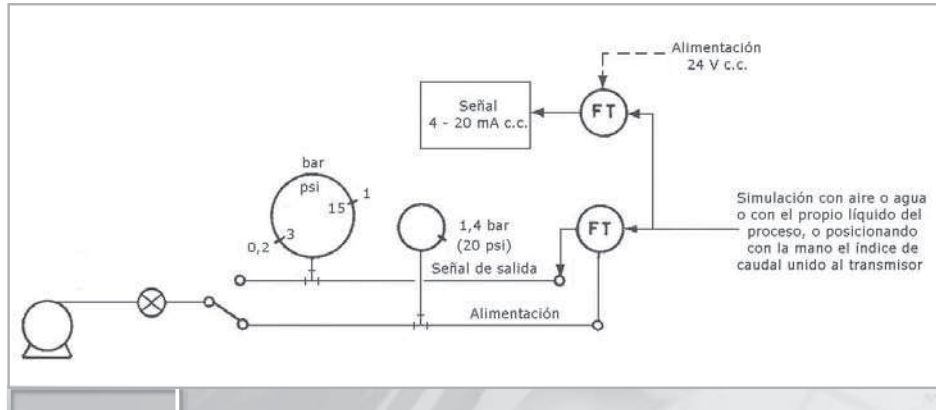
$\rho_{flotador}$  = densidad del flotador (acero inoxidable = 8,04)

y en el caso de vapor:

$$Q_{vapor} (Kg/min) = Q_{aire} (Nm^3/min) * 0,39 * \sqrt{\frac{\rho_{flotador}}{V_g}}$$

Siendo  $V_g$  = volumen específico del vapor de agua en las condiciones de servicio.

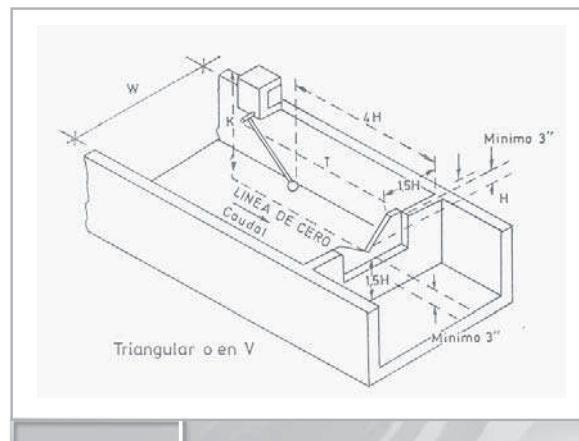
En el caso en que el rotámetro disponga de un transmisor, su calibración se efectúa según lo indicado en la figura 3.15.



**Figura 3.15** Esquema de calibración de rotámetros con transmisor neumático o electrónico.

### 3.4.3 Vertedero

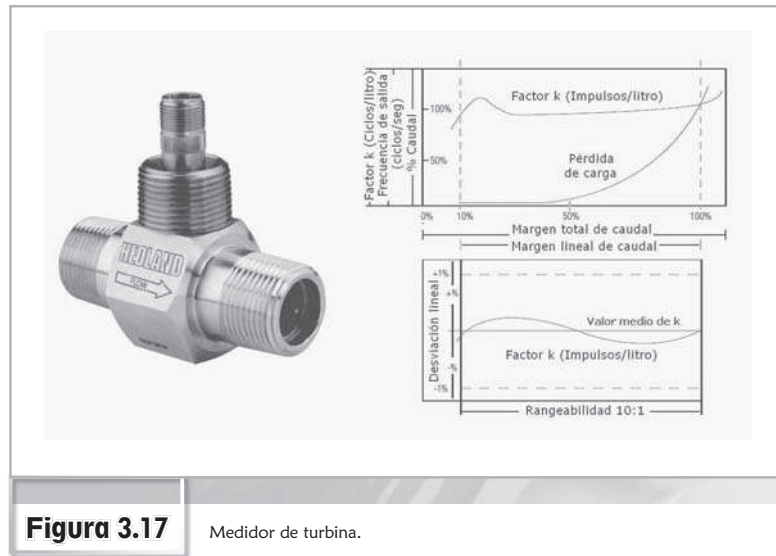
Su calibración queda reducida a la del instrumento de flotador incorporado, lo cual se realiza en general con una varilla graduada.



**Figura 3.16** Vertedero.

### 3.4.4 Medidores de turbina

Uno de los motivos de la calibración de los medidores de turbina suele ser la erosión a lo largo del tiempo si el fluido es algo agresivo (y no se han seleccionado bien los materiales en contacto con el fluido), o si falla el filtro que se coloca aguas arriba del medidor. En estos casos deja de cumplirse la curva de ciclos por litro (que es prácticamente una recta horizontal) que da el fabricante, y la única solución es el cambio del rotor.

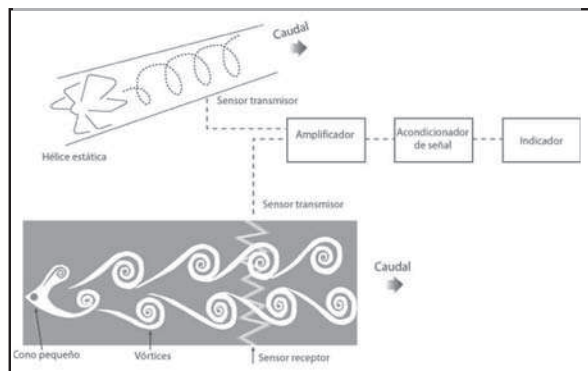


**Figura 3.17** Medidor de turbina.

La comprobación del medidor de turbina se reduce a hacer pasar varios caudales conocidos (medidos con otro medidor de turbina de exactitud en un laboratorio, o bien con una unidad portátil para una comprobación rápida o bien acoplando dos turbinas en serie durante un tiempo suficiente) y verificar la indicación o la señal de salida para cada uno de ellos. Los tornillos o ajustes de cero (zero) y de multiplicación (*span*) permitirán calibrar el medidor.

### 3.4.5 Medidor de torbellino y Vortex

El medidor de caudal por remolino (fig. 3.18) se basa en la determinación de la frecuencia del remolino producido por una hélice estática situada dentro de la tubería a través de la cual pasa el fluido (líquido o gas). La frecuencia del remolino es proporcional a la velocidad del fluido.



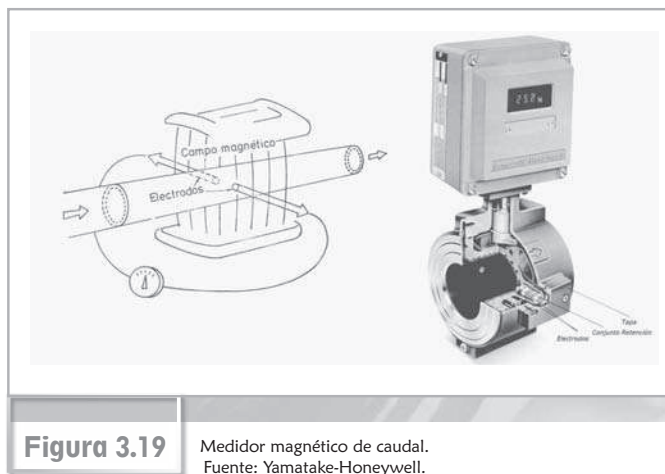
**Figura 3.18** Medidor de torbellino y vórtex.

El medidor vortex es parecido al de remolino, excepto que está basado en el efecto Von Karman donde un cuerpo en forma de cono genera alternativamente vórtices (áreas de baja presión e inestabilidad) desfasados en 180°, cuya frecuencia es directamente proporcional a la velocidad, y por tanto, al caudal.

El medidor de remolino y el vortex se han calibrado en fábrica y no necesitan ajustes especiales. Sin embargo, si se cambia el sensor o bien si cambian las condiciones de servicio, es necesario reajustarlo, siguiendo las instrucciones de operación indicadas en el manual del fabricante.

### 3.4.6 Medidor magnético de caudal

El medidor magnético de caudal dispone de diagnóstico de la señal de caudal, pero, al estar basado en la velocidad del líquido, el diámetro interior del elemento primario es crítico, por lo que debe mantenerse limpio en su interior y efectuar inspecciones periódicas.



**Figura 3.19**

Medidor magnético de caudal.  
Fuente: Yamatake-Honeywell.

Los medidores de caudal no requieren, normalmente, ajustes antes de la puesta en marcha. Los ajustes y la calibración necesarios se han llevado a cabo ya en la fábrica. Una vez que el instrumento está instalado y hecho las conexiones eléctricas, el medidor de caudal está listo para servicio. Basta llenar completamente la tubería con líquido y conectar el instrumento a la alimentación eléctrica.

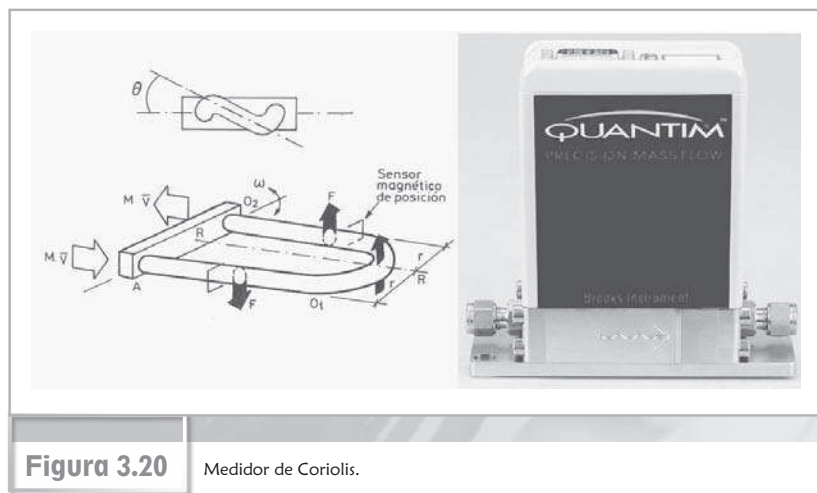
Los elementos magnéticos de caudal se calibran en fábrica utilizando un sistema dinámico de pesada que mide el tiempo empleado por el caudal del fluido en equilibrar un peso conocido.

Se dispone de autodiagnóstico del aparato, de detección automática del estado sin líquido de la tubería, y de capacidad para medir, manual o automáticamente, el caudal en los dos sentidos de circulación del fluido.

La exactitud es de  $\pm 0,5\%$  incluyendo los efectos combinados de linealidad, histéresis, repetibilidad e incertidumbre de la calibración.

### 3.4.7 Medidor de Coriolis

El *medidor de Coriolis* no tiene cálculos estándar de referencia y el estudio de la incertidumbre es puramente subjetivo. Es simple de operación y tiene un bajo mantenimiento. Sin embargo, debe inspeccionarse y limpiarse periódicamente.



**Figura 3.20** Medidor de Coriolis.

La exactitud es del orden de  $\pm 0,2\%$ .

### 3.4.8 Medidores volumétricos

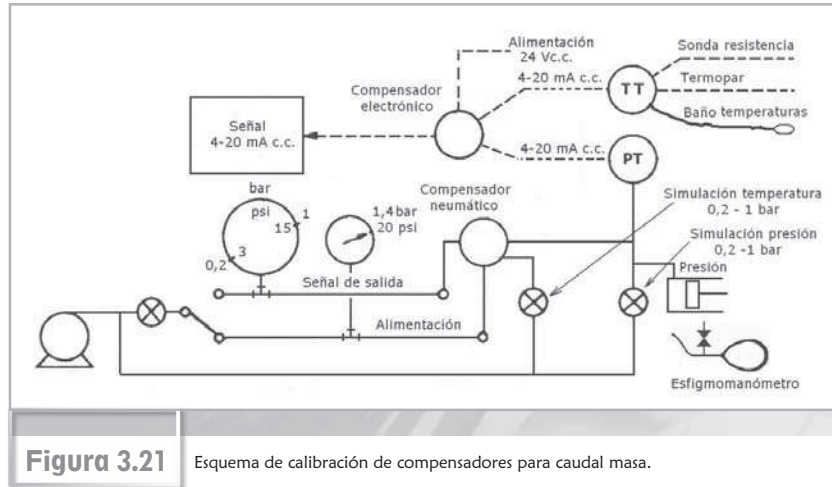
Los *medidores volumétricos* (desplazamiento positivo) pueden verificarse en el lugar en que están instalados si se dispone de medios para intercalar en serie otro medidor patrón que permitirá comprobar las medidas.

### 3.4.9 Medidores de caudal masa

Los *medidores directos* de caudal masa se calibran en la propia instalación con el mismo fluido de trabajo, asegurando un caudal masa constante y midiendo en un sistema receptor la masa del fluido corregida y el tiempo que ha transcurrido en la experiencia con un cronómetro de exactitud. Pueden verificarse en el lugar en que están instalados si se dispone de medios para intercalar en serie otro medidor patrón que permitirá comprobar las medidas.

En particular, los medidores de caudal están diseñados para trabajar con incertidumbres establecidas dentro de la rangeabilidad del caudal (campo del caudal mínimo al caudal máximo).

En los líquidos, un valor típico es  $0,05\%$  y en los gases de  $0,09\%$ , ambos con un nivel de confianza de  $95\%$  (factor de cobertura  $k = 2$ ).

**Figura 3.21**

Esquema de calibración de compensadores para caudal masa.

#### 3.4.10 Patrones internacionales de calibración de medidores de caudal de líquidos

La calibración óptima de medidores de caudal de líquidos en la industria petroquímica mediante la norma NIST se realiza empleando un sistema de pistón de medida que es empujado a velocidad constante por el líquido, el cual es bombeado en una longitud determinada durante un tiempo medido.

Sus características son:

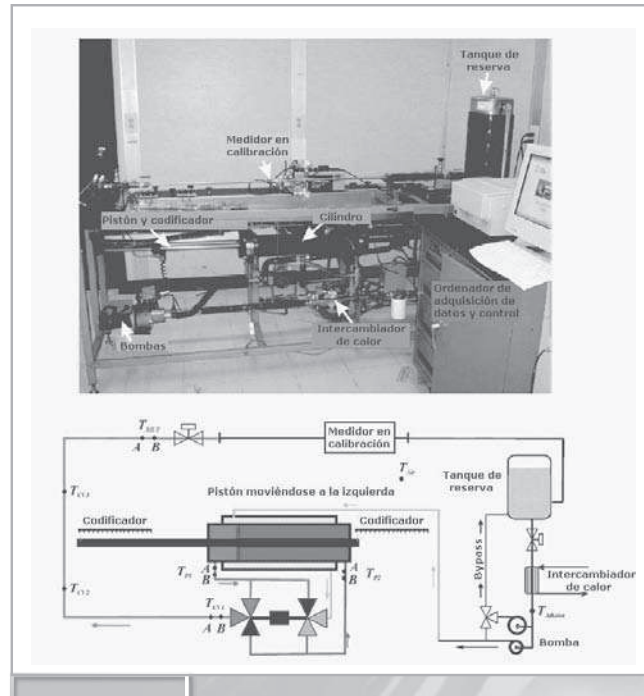
Fluido: MIL-C-7024C, llamado también disolvente Stoddard (solvente tipo 2) utilizado en combustibles jet JP-4 y JP-5.

Margen de caudal = 0,19 l/min a 5,7 l/min

Temperatura del líquido =  $22,2 \pm 0,5$  °C

Puntos de calibración = 10%, 20%, 35%, 50%, 75% y 100% de toda la escala.

Incertidumbre = 0,01% - nivel de confianza 95% (factor de cobertura  $k = 2$ )



**Figura 3.22** Calibrador de caudal de líquidos NIST.

Incertidumbres a varios caudales							
Q (l/min)	tc (s)	$\Delta Vp$ (cm <sup>3</sup> )	$\Delta L$ (cm)	Ua (%) - estadística	Ub (%) - otros medios	Incertidumbre combinada Uc	Incertidumbre expandida (k <sup>o</sup> Uc)
0,2	180	608	15	0,0018	0,0037		
0,4	180	1215	30	0,0009	0,0037		
0,8	113	1515	37,4	0,0007	0,0037		
1,5	60	1515	37,4	0,0007	0,0037		
3	32	1515	37,4	0,0007	0,0037		
5	18	1515	37,4	0,0007	0,0037		
Valores máximos de Ua y Ub				0,0018	0,0037	0,0041	0,0082

**Tabla 3.6** Incertidumbre calibrador caudal líquidos NIST

### 3.4.11 Patrones internacionales de calibración de medidores de caudal de agua

La calibración óptima de medidores de caudal de agua mediante la norma NIST se realiza mediante la medida de la longitud, la masa y el tiempo de flujos de agua en condiciones estables de caudal, presión y temperatura.

Los elementos que componen el sistema son:

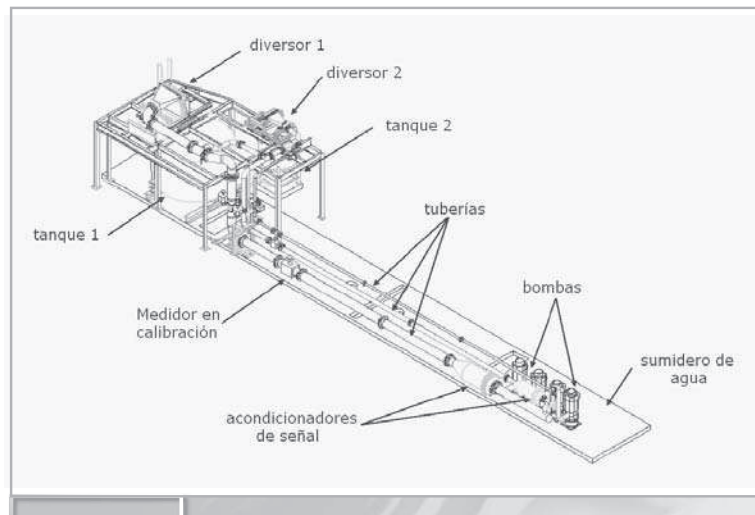
- Generación del flujo de agua mediante un tanque, bombas y un sistema de control de caudal que actúa sobre las válvulas de control.
- Tubería de ensayo que genera las condiciones de caudal requeridas por el medidor que se está calibrando.
- Sistema gravimétrico de referencia conformado por un tanque y un temporizador que determina el tiempo de entrada del agua en el tanque.

Margen de caudal de agua = 40 kg/min a 1.600 kg/min

Temperatura del líquido =  $22,2 \pm 0,5$  °C

Puntos de calibración = 40 l/min, 200 l/min, 500 l/min, 1.000 l/min y 1600 l/min.

Incertidumbre = 0,05% - nivel de confianza 95% (factor de cobertura  $k = 2$ )



**Figura 3.23**

Calibrador de medidores de caudal de agua.  
Fuente: NIST.

Con este sistema se calibran medidores de turbina, caudalímetros ultrasónicos, medidores de Coriolis y medidores magnéticos de caudal.

<b>Incertidumbre del calibrador de 3.000 kg y 600 kg de agua</b>			
	<b>Valor</b>	<b>Incertidumbre, %</b>	<b>Incertidumbre, %</b>
Masa recogida		3.000 kg	600 kg
1. Incertidumbre de la masa			
Indicación de la escala, 0,2 kg	0,2 kg	0,004	0,02
Deriva de la escala		0	0
Calibración de la escala		0,01	0,01
Corrección de empuje		0,0005	0,0005
Fugas		0	0
Efectos de almacenamiento		0,003	0,003
Evaporación		0,004	0,004
Incertidumbre total de la masa		0,012	0,023
2. Incertidumbre del tiempo de recogida			
Calibración del temporizador	0,0001 s	0,0004	0,0004
Actualización del temporizador y de la válvula divisora		0,01	0,01
Incertidumbre total del tiempo de recogida		0,01	0,01
3. Incertidumbre de la densidad del agua			
<b>Incertidumbre combinada del caudal Q</b>		0,016	0,026
<b>Incertidumbre expandida del caudal Q (nivel de confianza 95%)</b>		0,033	0,051

**Tabla 3.7**

Incertidumbre del calibrador para recogida de 3.000 kg y 600kg de agua.  
Fuente: NIST Calibration Services for Water Flowmeters.

### 3.4.12 Patrones internacionales de calibración de medidores de caudal de gas

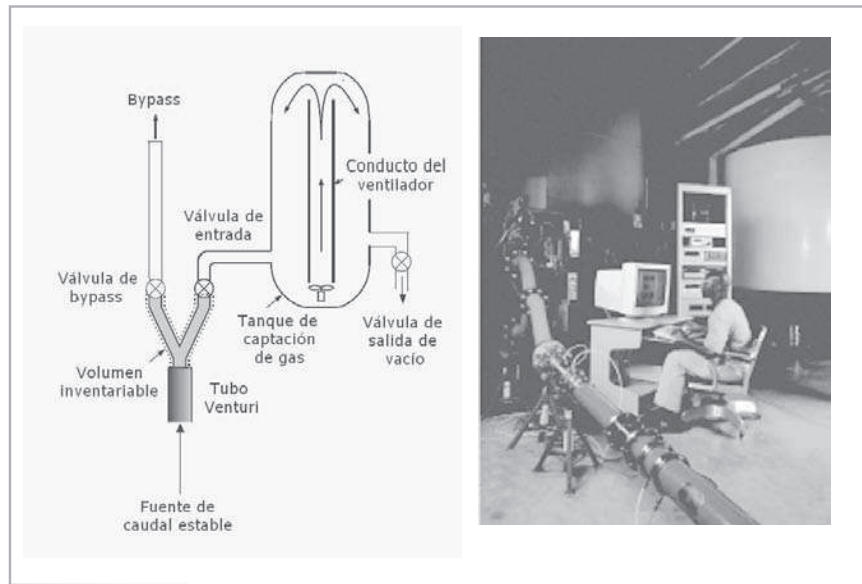
La calibración óptima de medidores de gases mediante la norma NIST se realiza mediante un sistema de pesada de la cantidad de gas que ha entrado en un tanque durante un tiempo determinado. El gas que se utiliza para la calibración es aire seco, manteniendo estables la temperatura y la presión. Sus características son:

Margen de caudal = 3200 l/min a 77.000 l/min

Temperatura de referencia = 293,15 °K

Presión de referencia = 101.325 kPa (1,01325 bar)

Incertidumbre = 0,09% - nivel de confianza 95% (factor de cobertura k = 2)



**Figura 3.24** Calibrador de medidores de caudal de gas.  
Fuente: NIST.

Con este sistema se calibran tubos Venturi, medidores de desplazamiento positivo, medidores térmicos de caudal masa y medidores de turbina.

Los medidores que tienen incertidumbres más grandes que el tubo Venturi deben ser calibrados por otros métodos más económicos.

Calibrador NIST de medición de caudal de gas				
Caudal estándar	Margen (l/min)	Tipo de gas	Margen de presiones (kPa)	Incertidumbre expandida ( $k = 2$ )%
34 L PVTt	1 a 100	Aire seco	100 a 1.700	0,05
	1 a 100	N <sub>2</sub>	100 a 7.000	0,03 a 0,04
	1 a 100	CO <sub>2</sub>	100 a 4.000	0,05
	1 a 100	Argón	100 a 7.000	0,05
	1 a 100	Helio	100 a 7.000	0,05
677 L PVTt	10 a 2.000	Aire	100 a 1.700	0,05
	10 a 150	N <sub>2</sub>	100 a 800	0,02 a 0,03
26 m <sup>3</sup> PVTt	200 a 77.000	Aire seco	200 a 800	0,09

**Tabla 3.8** Calibrador NIST de medición de caudal de gas.

## 3.5 Nivel

### 3.5.1 Instrumentos de medida directa

Para la calibración de aparatos de sonda, cinta y plomada, nivel de cristal y flotador, se utiliza en general una varilla graduada.

### 3.5.2 Instrumentos de presión hidrostática

La calibración de los instrumentos de nivel basados en la presión hidrostática se realiza en forma análoga a los instrumentos de presión, transformando la altura de líquido al valor correspondiente de la presión a simular.

### 3.5.3 Instrumentos de presión diferencial

Los medidores de nivel de presión diferencial se calibran en forma similar a los utilizados en la medida de caudal por presión diferencial.

La altura de líquido se transforma al valor correspondiente de la presión a simular.

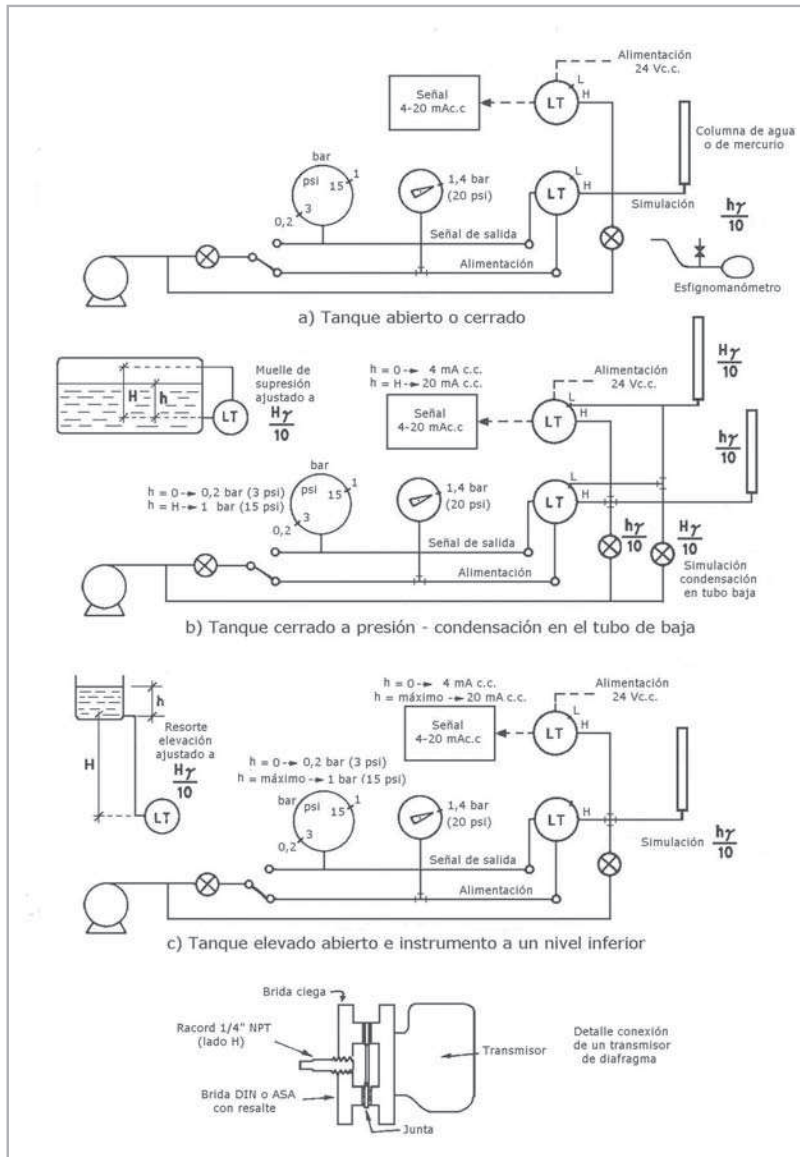
$$\text{Presión simulada} = \frac{h * \gamma}{10} \text{ bar}$$

Siendo: h = altura del líquido en metros

$\gamma$  = peso específico del líquido en gramos/cm<sup>3</sup>

Es preciso tener en cuenta las condiciones particulares del transmisor, es decir, si se instalará en un tanque abierto o cerrado y si dispone de resorte de supresión o de elevación para corregir la condensación en el lado de baja presión del instrumento, o compensar su instalación en un punto de cota muy inferior a la base del tanque.

En la figura 3.25 puede verse un esquema de calibración de los instrumentos basados en la presión hidrostática.



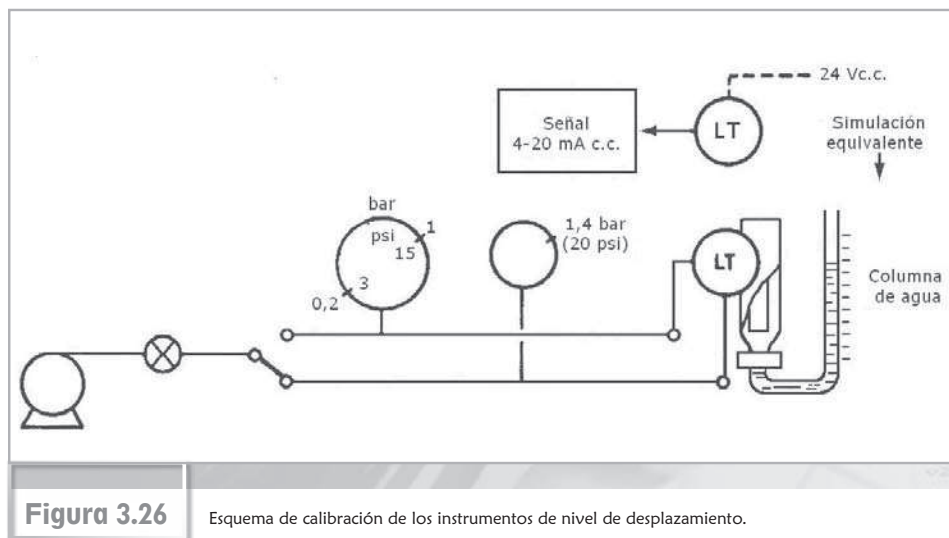
**Figura 3.25**

Esquema de calibración de instrumentos de nivel de presión hidrostática.

### 3.5.4 Instrumentos de desplazamiento

Un instrumento de nivel de desplazamiento se calibra conectándolo a un tubo transparente que permita ver la altura de agua. La variación de la altura de agua en el tubo simula los puntos de nivel en todo el campo de medida, y en el ensayo se sitúa el ajuste de densidad del instrumento en el valor 1. Una vez calibrado bastará cambiar el ajuste de densidad al valor que tenga el líquido de proceso.

En la figura 3.26 puede verse el esquema de calibración correspondiente.



En vez de utilizar una instalación de simulación del nivel pueden suspenderse pesos del brazo de torsión que representarán directamente los distintos niveles de líquido, o en otras palabras, las distintas longitudes de inmersión del flotador en el tanque.

La fórmula correspondiente es:

$$W = \text{peso del flotador} - \text{empuje del líquido}$$

El peso del flotador viene dado por el fabricante y el empuje del líquido depende del diámetro exterior del flotador, de la densidad del líquido y del porcentaje sumergido del flotador, según la fórmula:

$$\text{Empuje} = \frac{\pi * D^2}{4} * \gamma * C$$

- Siendo:
- D = diámetro exterior del flotador
  - $\gamma$  = peso específico del líquido
  - C = porcentaje sumergido del flotador

Los pesos se calculan considerando los porcentajes de inmersión del flotador de 25%, 50%, 75% y 100%. El porcentaje correspondiente a 0%, es decir, sin nivel en el tanque, corresponde al valor íntegro del peso del flotador. En algunos instrumentos el fabricante proporciona los pesos calibrados para simular el nivel. En este caso no hay necesidad de sumergir el flotador en agua, bastará colgar del brazo del flotador los pesos calibrados.

### 3.5.5 Instrumentos basado en características eléctricas del líquido

Estos instrumentos (conductor, capacitivo, ultrasónico y de radiación) se comprueban en el mismo lugar en el que están instalados, ajustando los tornillos de cero y multiplicación correspondientes. La indicación del nivel se obtiene mediante un nivel visual adosado al tanque, si este lo lleva incorporado, o midiendo el nivel desde alguna ventanilla de inspección situada en la parte superior del tanque.

### 3.5.6 Instrumentos de radiación

Los medidores de nivel de *radiación* requieren un extremo cuidado en su manejo y es preciso seguir fielmente las instrucciones descritas en el manual del fabricante y las normas y recomendaciones vigentes por los peligros que entraña la no observancia de los mismos.

## 3.6 Instrumentos de temperatura

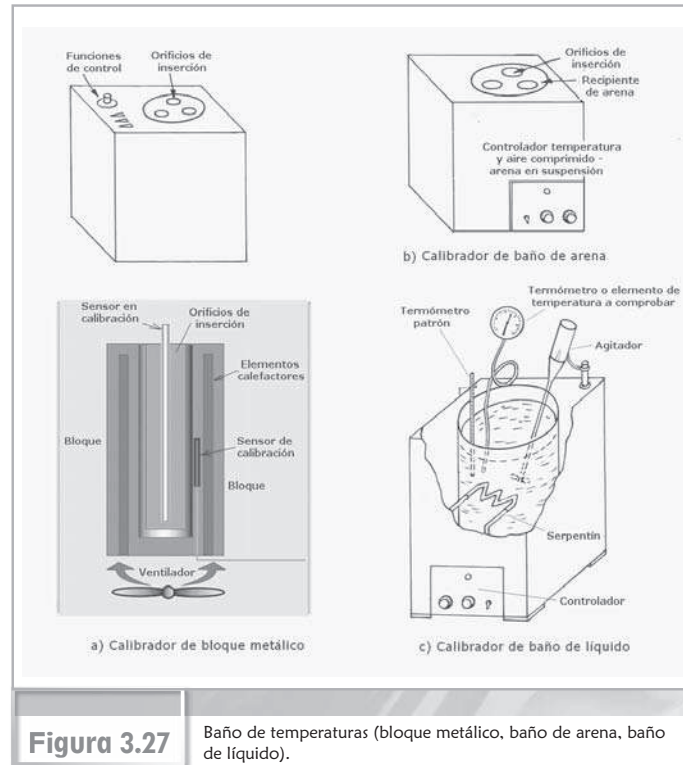
### 3.6.1 Calibradores y patrones

Para la calibración de instrumentos de temperatura se emplean baños de temperatura (*calibradores de bloque metálico, de baño de arena y de baño de líquido*), *hornos, comprobadores potenciométricos y de puente de Wheatstone y comprobadores universales*.

Los patrones primarios de temperatura utilizados en estos aparatos son las sondas de resistencia de platino Pt-25 y P1-100 y los termopares.

El calibrador de bloque metálico (figs. 3.27a y c) consiste en un bloque metálico calentado por resistencias con un controlador de temperatura de exactitud ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) adecuado para aplicaciones de alta temperatura ( $-25^\circ\text{C}$  a  $1.200^\circ\text{C}$ ). El control se realiza con aire comprimido, lo que permite reducir la temperatura desde  $1.200^\circ\text{C}$  a la temperatura ambiente en unos 10-15 minutos. En el calibrador hay orificios de inserción para introducir un termopar patrón y la sonda de temperatura a comprobar.

El calibrador de baño de arena (fig. 3.27b) consiste en un depósito de arena u otro sólido muy fino que contiene tubos de inserción para la sonda de resistencia o el termopar patrón y para las sondas de temperatura a comprobar. La arena caliente o el sólido (partículas inertes de óxido de aluminio) es mantenido en suspensión (fluidificado) por medio de una corriente de aire o nitrógeno, asegurando así la distribución uniforme de temperaturas y su transferencia a lo largo de los tubos de inserción, calentando rápidamente las sondas que se comprueban. El gas (aire o nitrógeno) fluye a baja velocidad hacia arriba, lo que mantiene las partículas en movimiento, las separa y las suspende en un nivel estable, en forma parecida a la de un líquido en ebullición.



La temperatura de trabajo puede seleccionarse entre 50 °C a 600 °C y la potencia eléctrica varía entre 750 W y 4 kW.

El calibrador de *baño de líquido* (fig. 3.27c) consiste en un tanque de acero inoxidable lleno de líquido con un agitador incorporado, un termómetro patrón sumergido y un controlador de temperatura que actúa sobre un conjunto de resistencias calefactoras. Los líquidos mejoran la conducción y evitan la formación de gradientes de temperatura, así como puntos fríos o calientes.

Se utilizan varios tipos de fluidos, dependiendo de la temperatura de trabajo, tricloroetileno (-80 °C a temperatura ambiente), etilenglicol y agua (-20 °C a temperatura ambiente), aceite fluido y aceite de silicona (temperatura ambiente a 260 °C) y sales sólidas a temperatura ambiente y que funden a la temperatura de trabajo (220 °C a 700 °C).

Los hornos de temperatura son hornos de mufla calentados por resistencias eléctricas y con tomas adecuadas para introducir los elementos primarios del instrumento a comprobar.

Uno de los modelos es una cavidad de Inconel 600 que es calentado a 900 °C, con lo que la superficie del metal al oxidarse queda estabilizada. La capa de óxido puede considerarse como la emisividad efectiva del cuerpo negro de 0,999 y proporciona una fuente patrón para la calibración de termómetros entre 50 °C y 1000 °C.

La temperatura de la cavidad se mide utilizando un termómetro de resistencia de platino para el rango de temperaturas entre 50 °C y 500 °C y un termopar tipo R entre 500 °C y 1000 °C. El punto de consigna de la temperatura se alcanza en unos treinta minutos, pero se necesitan unos 180 minutos para alcanzar el equilibrio térmico de todos los componentes del horno (masa del horno y las sondas de temperatura).

Dentro del horno pueden introducirse crisoles con sales específicas que funden a temperaturas determinadas y que permiten obtener puntos fijos de calibración.

En la tabla 3.8 puede verse la Escala internacional de temperaturas de 1990, basada en 17 puntos fijos de temperatura. Los puntos fijos son cambios de estado bien definidos y reproducibles (puntos triples, puntos de fusión y puntos de solidificación), de elementos o sustancias muy puras, a los que se asignan valores de temperatura de acuerdo con las mejores determinaciones del momento. Su objeto es mantener la Escala internacional de temperatura entre -40 °C y 1.084 °C.

Punto fijo nº	Cuerpo	Estado	Temperatura, °C
1	He	Vapor	-270,15 a -268,15
2	E - H <sub>2</sub>	Punto triple	-259,3467
3	E - H <sub>2</sub>	Vapor	-256,16
4	E - H <sub>2</sub>	Vapor	-252,85
5	Neón	Punto triple	- 248,5939
6	O <sub>2</sub>	Punto triple	-218,7916
7	Ar	Punto triple	-189,3442
8	Hg	Punto triple	- 38,8344
9	H <sub>2</sub> O	Punto triple	0,01
10	Ga	Fusion	29,7646
11	In	Solidificacion	156,5985
12	Sn	Solidificacion	231,928
13	Zn	Solidificacion	419,527
14	Al	Solidificacion	660,323
15	Ag	Solidificacion	961,78
16	Au	Solidificacion	1064,18
17	Cu	Solidificacion	1084,62

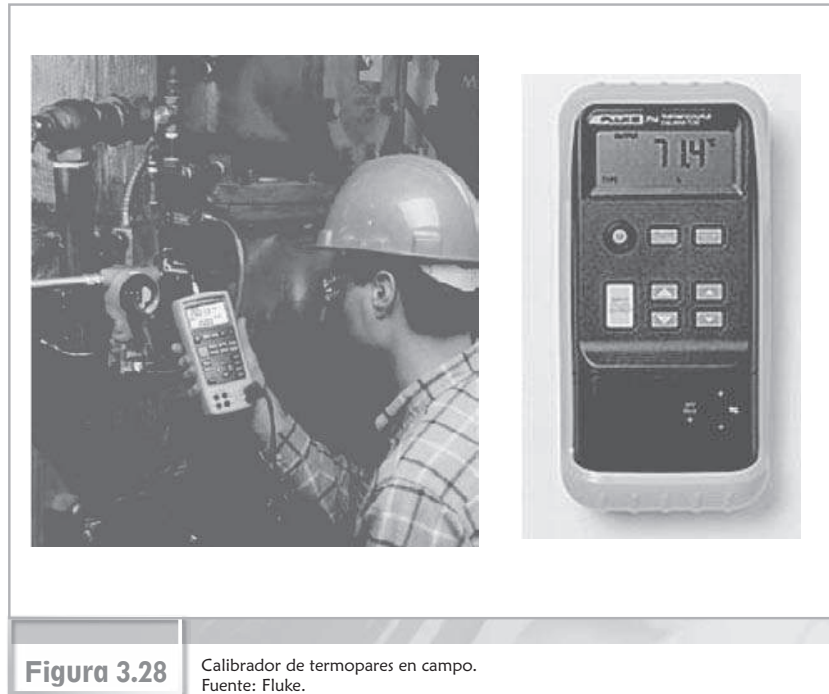
**Tabla 3.9** Escala internacional de temperaturas de 1990 (ITS-90)

Los calibradores de termopares en campo miden y simulan temperaturas típicamente para 9 tipos de termopares y tienen las características:

Margen: -200 °C a 1.800 °C

Resolución: 0,1 °C a 1 °C

Exactitud: 0,3 °C + 10 μV



Existen calibradores de temperatura portátiles muy completos que utilizan un calibrador de bloque, un calibrador de baño de líquido y un termómetro patrón de referencia (figura 3.29). Sus características son:

Intervalo de temperaturas =  $-40\text{ °C}$  a  $150\text{ °C}$ .

Estabilidad al cabo de 30 minutos de la estabilización =  $\pm 0,02\text{ °C}$

Como bloque seco =  $\pm 0,005\text{ °C}$

Como baño de líquido con agitador =  $\pm 0,001\text{ °C}$

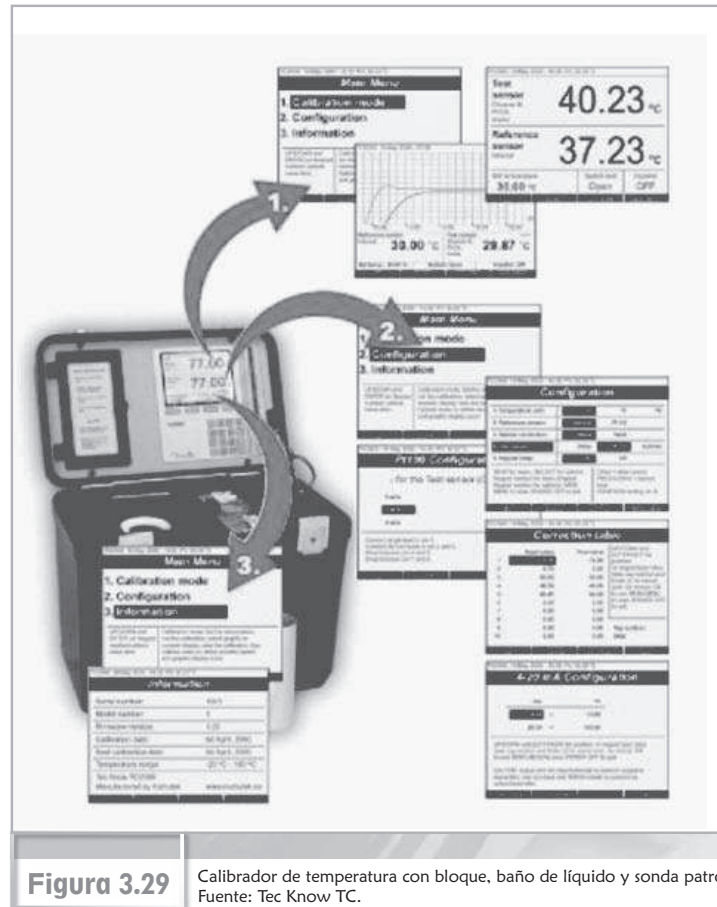
Resolución =  $0,01\text{ °C}$

Exactitud =  $\pm 0,3\text{ °C}$

Incertidumbre óptima =  $\pm 0,03\text{ °C}$

Puntos fijos de calibración = 20

Informes de calibración = ISO-9000, vía red de comunicaciones RS232



**Figura 3.29**

Calibrador de temperatura con bloque, baño de líquido y sonda patrón.  
Fuente: Tec Know TC.

### 3.6.2 Calibración de sondas de resistencia e instrumentos de puente de Wheatstone

La medida de temperatura utilizando sondas de resistencia se basa en la variación de la resistencia de un sensor en función de la temperatura. El material que forma el sensor se caracteriza por el llamado «coeficiente de temperatura de resistencia» que expresa, a una temperatura especificada, la variación de la resistencia en ohmios del conductor por cada grado que cambia su temperatura.

El elemento consiste usualmente en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor adecuado bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o de cerámica.

Para comprobar una *sonda de resistencia* se mide su valor a varias temperaturas y se compara con la indicada en las tablas de resistencia (tabla 3.11). La más común es la sonda de resistencia de platino Pt 100 que tiene una resistencia de 100 ohms a 0 °C y 138,4 ohm a 100 °C. Hay otras sondas que tienen 25 ohm (Pt25) y 1.000 ohm a 0 °C (Pt1000).

Calibrador de temperatura con bloque, baño de líquido y termómetro patrón			
Especificaciones	Intervalo de medida	Resolución.	Exactitud
Entrada puerto A, Pt 100 2, 3, 4 hilos	-50 a 800° C	0.01° C	+/-0.05° C +/-0.009% lectura
Entrada puerto B, Pt 100 2, 3, 4 hilos	-50 a 800° C	0.01° C	+/-0.05° C +/-0.009% lectura
Tipo K:	-100 a 1370° C	0.1° C	+/-0.25° C +/-0.03% lectura
Tipo J:	-200 a 1200° C	0.1° C	+/-0.25° C +/-0.03% lectura
Tipo E:	-200 a 1000° C	0.1° C	+/-0.25° C +/-0.04% lectura
Tipo T:	-200 a 400° C	0.1° C	+/-0.25° C +/-0.03% lectura
Tipo S:	0 a 1760° C	0.1° C	+/-0.25° C +/-0.03% lectura
Tipo R:	0 a 1760° C	0.1° C	+/-0.25° C +/-0.03% lectura
Tipo B:	400 a 1820° C	0.1° C	+/-0.25° C +/-0.03% lectura
Tipo N:	-200 a 1300° C	0.1° C	+/-0.25° C +/-0.05% lectura
Tensión:	0 a 10V	1uV	+/-2uV +/-0.02% lectura
Corrientes:	0 a 22mA	1uA	+/-2uA +/-0.02% lectura
Unión fría**:	0 a 40° C	0.1° C	+/-0.25% lectura
Deriva de la temperatura de entrada al termopar	+/-0.009%/° C o 90 ppm/°C		
Deriva de la temperatura de entrada a V y mA	+/-0.0027%/° C o 27 ppm/°C		
* Pt 100 según IEC751 y escala de temperaturas ITS-90			
** Todas las entradas de termopares tienen compensación de la unión fría			

Tabla 3.10

Calibrador de temperatura con bloque, baño de líquido y termómetro patrón

La exactitud de las sondas de resistencia es:

$\pm 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$  a  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  -  $\pm 0,8 \text{ } ^\circ\text{C}$  a  $100 \text{ } ^\circ\text{C}$  = norma BS1904 clase B (DIN 43760)

$\pm 0,15 \text{ } ^\circ\text{C}$  a  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  – norma BS1904 clase A

$\pm 0,03 \text{ } ^\circ\text{C}$  a  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  –  $\pm 0,12 \text{ } ^\circ\text{C}$  a  $100 \text{ } ^\circ\text{C}$  = clase 1/10 DIN

Código de colores de los cables de la sonda = normas IEC751 y JISC1604-1989.

Las tablas de temperatura - sonda de resistencia Pt 100 ( $100 \text{ } \Omega$  a  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) son:

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Resistencia en ohmios</i>										
-220	10,408									
-210	14,360	13,951	13,546	13,145	12,746	12,350	11,955	11,565	11,177	10,793
-200	18,530	18,109	17,689	17,268	16,849	16,429	16,012	15,595	15,182	14,769
-190	22,782	22,354	21,928	21,501	21,073	20,646	20,221	19,796	19,373	18,950
-180	27,049	26,623	26,197	25,771	25,345	24,918	24,492	24,064	23,637	23,209
-170	31,280	30,859	30,437	30,015	29,592	29,169	28,746	28,322	27,898	27,473
-160	35,478	35,060	34,641	34,222	33,803	33,383	32,963	32,543	32,122	31,701
-150	39,651	39,234	38,818	38,401	37,984	37,567	37,150	36,732	36,315	35,897
-140	43,802	43,387	42,973	42,559	42,144	41,729	41,314	40,898	40,483	40,067
-130	47,932	47,520	47,107	46,695	46,282	45,869	45,456	45,043	44,629	44,215
-120	52,041	51,631	51,221	50,811	50,400	49,989	49,578	49,167	48,755	48,344
-110	56,131	55,722	55,314	54,906	54,497	54,088	53,679	53,270	52,861	52,451
-100	60,201	59,794	59,388	58,982	58,575	58,168	57,761	57,354	56,946	56,538
-90	64,252	63,847	63,443	63,039	62,634	62,229	61,823	61,418	61,012	60,607
-80	68,282	67,880	67,478	67,075	66,673	66,270	65,866	65,463	65,059	64,656
-70	72,291	71,892	71,419	71,091	70,690	70,290	69,889	69,487	69,086	68,684
-60	76,279	75,882	75,483	75,085	74,687	74,288	73,889	73,490	73,091	72,691
-50	80,250	79,854	79,457	79,061	78,664	78,267	77,870	77,472	77,075	76,677
-40	84,212	83,816	83,420	83,024	82,628	82,232	81,836	81,439	81,043	80,647
-30	88,170	87,774	87,378	86,983	86,587	86,191	85,795	85,399	85,003	84,607
-20	92,127	91,731	91,336	90,940	90,545	90,149	89,753	89,357	88,962	88,566
-10	96,072	95,679	95,285	94,891	94,496	94,102	93,707	93,312	92,917	92,522
0	100,000	99,608	99,216	98,823	98,431	98,038	97,645	97,253	96,859	96,466
0	100,000	100,391	100,781	101,172	101,562	101,952	102,343	102,733	103,123	103,512
10	103,902	104,292	104,681	105,070	105,460	105,894	106,238	106,627	107,015	107,404
20	107,793	108,181	108,569	108,957	109,345	109,733	110,121	110,509	110,897	111,284
30	111,671	112,059	112,446	112,833	113,220	113,607	113,993	114,380	114,766	115,153
40	115,539	115,925	116,311	116,697	117,083	117,468	117,854	118,239	118,624	119,010
50	119,395	119,780	120,164	120,549	120,934	121,318	121,702	122,087	122,471	122,855
60	123,239	123,623	124,006	124,390	124,773	125,157	125,540	125,923	126,306	126,689
70	127,071	127,454	127,837	128,219	128,601	128,983	129,365	129,747	130,129	130,511
80	130,893	131,275	131,656	132,037	132,418	132,800	133,180	133,560	133,941	134,321
90	134,702	135,082	135,463	135,843	136,223	136,602	136,982	136,362	137,741	138,121
100	138,500	138,879	139,258	139,637	140,016	140,395	140,773	141,152	141,530	141,908
110	142,286	142,664	143,042	143,420	143,798	144,175	144,553	144,930	145,307	145,684
120	146,061	146,438	146,815	147,191	147,568	147,944	148,320	148,697	149,073	149,449
130	149,824	150,200	150,576	150,951	151,326	151,702	152,077	152,452	152,827	153,201
140	153,576	153,951	154,323	154,699	155,075	155,448	155,822	156,195	156,569	156,943
150	157,316	157,690	158,063	158,436	158,809	159,182	159,555	159,927	160,300	160,672
160	161,045	161,417	161,785	162,161	162,533	162,905	163,276	163,648	164,019	164,391
170	164,762	165,133	165,504	165,875	166,245	166,616	166,986	167,357	167,727	168,097
180	168,467	168,837	169,209	169,576	169,946	170,315	170,685	171,054	171,423	171,792
190	172,161	172,530	172,898	173,267	173,625	174,003	174,372	174,740	175,108	175,475
200	175,843	176,211	176,578	176,946	177,313	177,689	178,047	178,414	178,781	179,147
210	179,514	179,880	180,247	180,613	180,979	181,345	181,711	182,076	182,442	182,808
220	183,173	183,538	183,903	184,268	184,633	184,998	185,363	185,727	186,092	186,456
230	186,821	187,185	187,549	187,913	188,276	188,640	189,004	189,367	189,730	190,093
240	190,457	190,819	191,182	191,545	191,908	192,270	192,633	192,995	193,357	193,719
250	194,081	194,443	194,804	195,166	195,527	195,889	196,250	196,611	196,972	197,333
260	197,694	198,054	198,415	198,775	199,136	199,496	199,856	200,216	200,576	200,935
270	201,295	201,655	202,014	202,373	202,732	203,091	203,450	203,809	204,168	204,526
280	204,885	205,243	205,601	205,959	206,317	206,675	207,033	207,391	207,748	208,106
290	208,463	208,820	209,177	209,534	209,891	210,248	210,604	210,961	211,317	211,673
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

**Tabla 3.11**

Valores de resistencia según la temperatura en °C para las sondas de resistencia Pt 100 con coeficiente de variación de resistencia 0.00385 según DIN 43.760 (IPTS-68)

°C	Resistencia en ohmios									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
300	212,030	212,386	212,741	213,097	213,453	213,808	214,164	214,519	214,874	215,230
310	215,585	215,939	216,294	216,649	217,003	217,358	217,712	218,066	218,420	218,774
320	219,128	219,482	219,835	220,189	220,542	220,895	221,248	221,602	221,954	222,307
330	222,660	223,012	223,365	223,717	224,069	224,421	224,773	225,125	225,477	225,829
340	226,180	226,532	226,883	227,234	227,585	227,936	228,287	228,638	228,988	229,339
350	229,689	230,039	230,389	230,739	231,089	231,439	231,789	232,138	232,488	232,837
360	233,689	233,535	233,884	234,233	234,582	234,930	235,279	235,627	235,975	236,324
370	236,672	237,020	237,367	237,715	238,063	238,410	238,757	239,105	239,452	239,799
380	240,146	240,492	240,839	241,186	241,532	241,878	242,225	242,571	242,917	243,262
390	243,608	243,954	244,299	244,645	244,990	245,335	245,680	246,025	246,370	246,715
400	247,059	247,404	247,748	248,092	248,436	248,780	249,124	249,468	249,811	250,155
410	250,498	250,842	251,185	251,528	251,871	252,214	252,556	252,899	253,242	253,584
420	253,926	254,268	254,610	254,952	255,294	255,636	255,977	256,319	256,660	257,001
430	257,342	257,683	258,024	258,365	258,706	259,046	259,387	259,727	260,067	260,407
440	260,747	261,087	261,427	261,766	262,106	262,445	262,784	263,123	263,462	263,801
450	264,140	264,479	264,817	265,156	265,494	265,832	266,170	266,508	266,846	267,184
460	267,522	267,859	268,196	268,534	268,871	269,208	269,545	269,882	270,218	270,555
470	270,891	271,228	271,564	271,900	272,236	272,572	272,908	273,244	273,579	273,914
480	274,250	274,585	274,920	275,255	275,590	275,925	276,259	276,594	276,928	277,262
490	277,597	277,931	278,265	278,598	278,932	279,266	279,599	279,932	280,266	280,599
500	280,932	281,265	281,597	281,930	282,263	282,595	282,927	283,260	283,592	283,924
510	284,255	284,587	284,919	285,250	285,582	285,913	286,244	286,575	286,906	287,237
520	287,568	287,898	288,229	288,559	288,889	289,219	289,549	289,879	290,209	290,539
530	290,868	291,198	291,527	291,856	292,185	292,514	292,843	293,172	293,500	293,829
540	294,157	294,485	294,813	295,141	295,469	295,797	296,125	296,452	296,780	297,107
550	297,434	297,761	297,089	298,415	298,742	299,069	299,395	299,722	300,048	300,374
560	300,700	301,026	301,352	301,678	302,003	302,329	302,654	302,979	303,304	303,629
570	303,954	304,279	304,604	304,928	305,253	305,577	305,901	306,226	306,550	306,874
580	307,197	307,512	307,844	308,168	308,491	308,814	309,137	309,460	309,783	310,106
590	310,428	310,751	311,073	311,395	311,717	312,039	312,361	312,683	313,005	313,326
600	313,648	313,969	314,290	314,611	314,932	315,253	315,574	315,895	316,215	316,535
610	316,856	317,176	317,496	317,816	318,136	318,455	318,775	319,094	319,414	319,733
620	320,052	320,371	320,690	321,009	321,327	321,646	321,964	322,283	322,601	322,919
630	323,237	323,555	323,873	324,190	324,508	324,825	325,142	325,459	325,776	326,093
640	326,410	326,727	327,043	327,360	327,676	327,992	328,309	328,625	328,940	329,256
650	329,572	329,887	330,203	330,518	330,833	331,148	331,463	331,778	332,093	332,408
660	332,722	333,036	333,351	333,665	333,979	334,293	334,607	334,920	335,234	335,547
670	335,861	336,174	336,487	336,800	337,113	337,426	337,738	338,051	338,363	338,675
680	338,988	339,300	339,612	339,923	340,235	340,547	340,858	341,170	341,481	341,792
690	342,103	342,414	342,725	343,035	343,346	343,656	343,967	344,277	344,587	344,897
700	345,207	345,517	345,826	346,136	346,445	346,754	347,064	347,373	347,682	347,990
710	348,299	348,608	348,916	349,225	349,533	349,841	350,149	350,457	350,765	351,072
720	351,380	351,687	351,995	352,302	352,609	352,916	353,223	353,529	353,836	354,143
730	354,449	354,755	355,061	355,367	355,673	355,979	356,285	356,591	356,896	357,201
740	357,507	357,812	358,117	358,422	358,726	359,031	359,336	359,640	359,944	360,249
750	360,553	360,857	361,160	361,464	361,768	362,071	362,375	362,678	362,981	363,284
760	363,587	363,890	364,193	364,495	364,798	365,100	365,402	365,704	366,006	366,308
770	366,610	366,912	367,213	367,515	367,816	368,117	368,418	368,719	369,020	369,321
780	369,621	369,922	370,222	370,522	370,823	371,123	371,422	371,722	372,022	372,322
790	372,621	372,920	373,220	373,519	373,818	374,116	374,415	374,714	375,013	375,311
800	375,609	375,907	376,205	376,503	376,801	377,099	377,396	377,694	377,991	378,289
810	378,586	378,883	379,180	379,477	379,773	380,070	380,366	380,662	380,959	381,255
820	381,551	381,847	382,143	382,438	382,734	383,029	383,324	383,620	383,914	384,209
830	384,504	384,799	385,094	385,388	385,682	385,977	386,271	386,565	386,859	387,153
840	387,446	387,740	388,033	388,327	388,620	388,913	389,206	389,499	389,791	390,084
850	390,377									
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

**Tabla 3.11**  
continuación

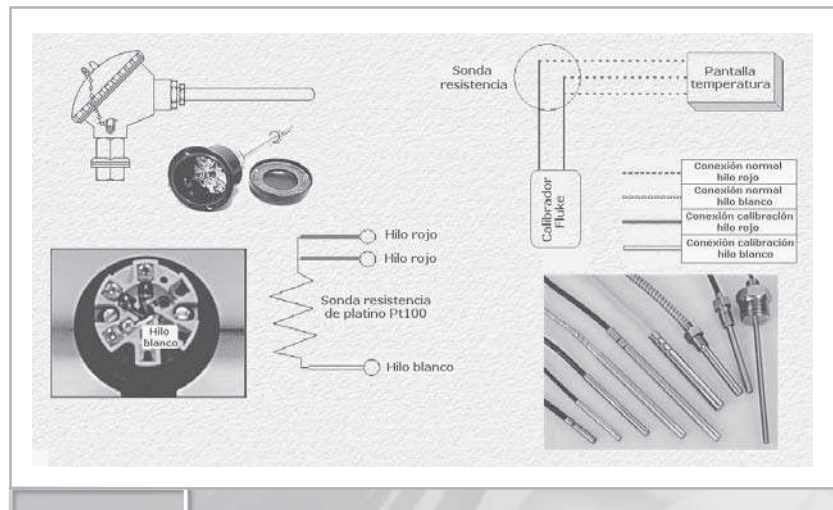
Valores de resistencia según la temperatura en °C para las sondas de resistencia Pt 100 con coeficiente de variación de resistencia 0.00385 según DIN 43.760 (IPTS-68)

Las sondas de resistencia son muy estables, ya que en el proceso de su fabricación se calienta el hilo para homogeneizar la estructura de cristal y eliminar los óxidos. La deriva en la sonda Pt 100 es de  $\pm 0,05$  °C/año y dentro del margen de temperatura de 25 – 150 °C es tan pequeño como  $\pm 0,005$  °C/año.

Es raro que las sondas de resistencia presenten derivas fuera de estos márgenes, de modo que las averías más probables son cortocircuitos o interrupción del circuito en el caso de fuertes vibraciones en la conexión del elemento con el proceso. Por ejemplo, en la industria láctea en el proceso de ebullición de la leche.

Un motivo de mala indicación de la temperatura es una inserción escasa de la vaina en el proceso. Se requiere un mínimo de 25 mm de exposición. Si no se cumple este valor, es probable que la sonda indique una temperatura errónea del proceso al ser afectada por el ambiente exterior que rodea la vaina.

El circuito típico de un calibrador de sonda de resistencia consta de la sonda de tres hilos, el cable de interconexión, la tarjeta de entrada del PLC, la conexión al ordenador y la pantalla de visualización de la temperatura (figura 3.30).



**Figura 3.30**

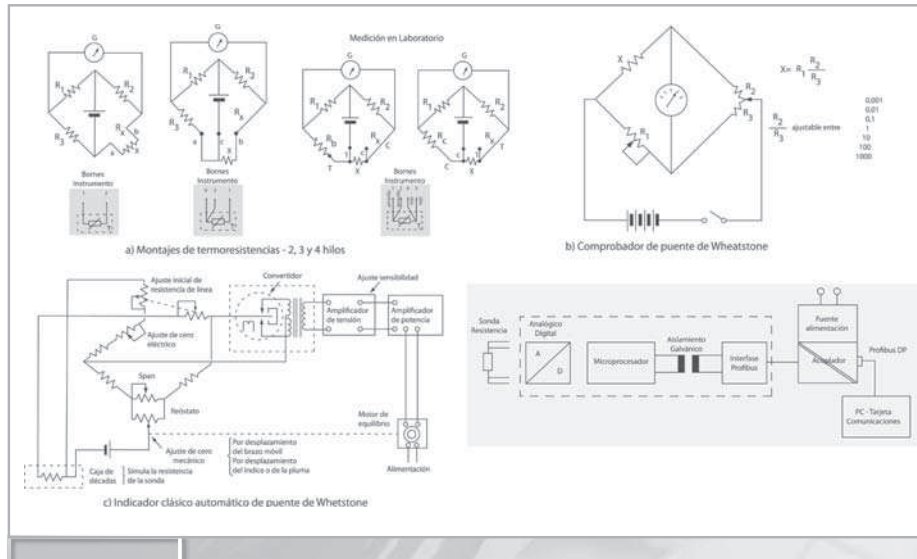
Calibración de sondas de resistencia e indicadores o controladores.  
Fuente: Fluke.

Hay dos formas de comprobar una sonda de resistencia.

1. Se inyecta una corriente conocida a través de la sonda de resistencia y se mide la caída de tensión. La resistencia será  $R = V/I$ , con lo cual puede conocerse la temperatura del proceso consultando las tablas de sondas de resistencia.
2. Utilizando un comprobador de puente de Wheatstone (fig. 3.31).

La resistencia desconocida X equivale a: 
$$X = R1 * \frac{R2}{R3}$$

En donde R1 es una resistencia que se hace variar en múltiplos de 10 (9\*1, 9\*10, 9\*100, 9\*1000), y la relación R2/R3 varía desde 0,001, 0,01, 0,1, 1, 10, 100, 1000.



**Figura 3.31** Circuito de puente de Wheatstone.

Por otro lado, si se conocen la tensión de excitación del puente  $V_{ex}$  y las 3 resistencias, la tensión medida a través de la sonda de resistencia es:

$$V_0 = V_{ex} * \left( \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) - V_{ex} * \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

Y el valor de la resistencia de la sonda:

$$R_4 = \frac{(R_1 * (V_{ex} - V_0) - R_2 * V_0) * R_3}{R_1 * V_0 + R_2 * (V_{ex} * V_0)}$$

La relación linealizada entre la resistencia y la temperatura puede verse en las expresiones siguientes:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t)$$

en la que:

- R<sub>0</sub> = resistencia en ohmios a 0 °C
- R<sub>t</sub> = resistencia en ohmios a t °C
- α = coeficiente de temperatura de la resistencia de platino cuyo valor entre 0° y 100 °C es 0,003850 Ω • Ω<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup> en la Escala Práctica de Temperaturas Internacional (IPTS-68).

O bien en los polinomios Van-Dussen (EN-IEC 60751):

$$R_t = R_0 [1 + A \cdot t + Bt^2 + C \cdot (t-100) \cdot t^3] \quad \text{válida de } -200 \text{ a } 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_t = R_0 [1 + A \cdot t + Bt^2] \quad \text{válida de } 0 \text{ a } 850 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Siendo:  $A = 3,9083 \cdot 10^{-3}$

$B = -5,775 \cdot 10^{-7}$

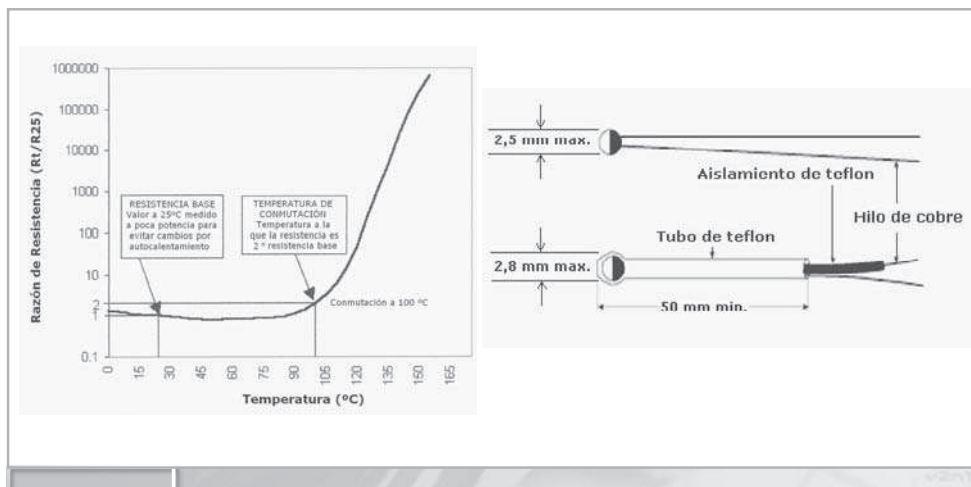
$C = -4,183 \cdot 10^{-12}$

Para comprobar un instrumento de temperatura de puente de Wheatstone se emplean cajas de resistencias patrones (caja con décadas) que simulan los valores que la sonda de resistencia en campo irá tomando de acuerdo con las temperaturas del proceso. La exactitud correspondiente a las cajas patrones es elevada, del orden de  $\pm 0,01$  a  $\pm 0,2\%$  del campo de medida.

### 3.6.3 Termistores

Los termistores son semiconductores electrónicos con un coeficiente de temperatura de resistencia negativo de valor elevado (NTC), por lo que presentan unas variaciones rápidas y extremadamente grandes para los cambios relativamente pequeños en la temperatura. Los termistores se fabrican con óxidos de níquel, manganeso, hierro, cobalto, cobre, magnesio, titanio y otros metales, y están encapsulados en sondas y en discos.

En la figura 3.32 pueden verse las curvas características resistencia-temperatura de termistores y las dimensiones aproximadas de las sondas.



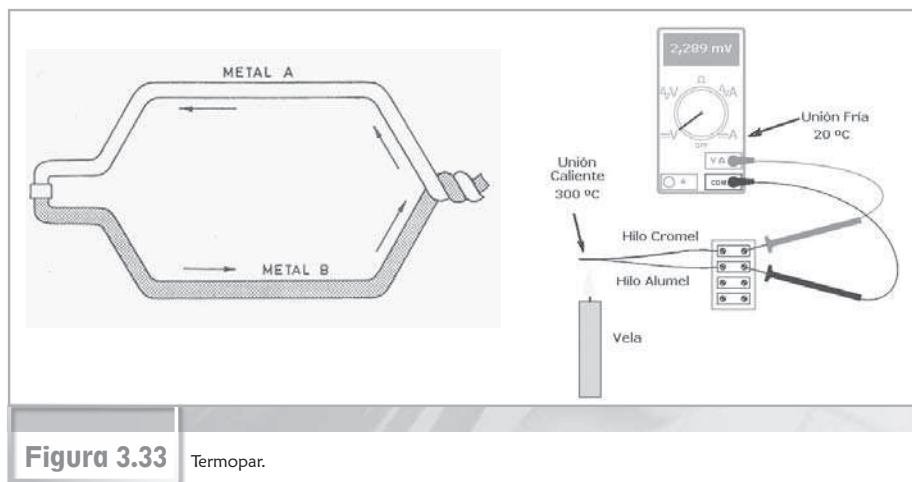
**Figura 3.32** Curva resistencia-temperatura y dimensiones de un termistor.

Los termistores se conectan a puentes de Wheatstone convencionales o a otros circuitos digitales de medida de resistencia. En intervalos amplios de temperatura los termistores tienen características no lineales, de modo que el rango de medida debe ser muy pequeño para que sea lineal la relación temperatura – resistencia. Son muy sensibles y permiten intervalos de medida muy pequeños de 1 °C (*span*). Son de pequeño tamaño, frágiles y susceptibles de deriva y su tiempo de respuesta depende de la capacidad térmica y de la masa del termistor variando de 0,5 a 10 segundos.

Los termistores encuentran su principal aplicación en la medición, la compensación y el control de temperatura, y como medidores de temperatura diferencial.

### 3.6.4 Calibración de termopares e instrumentos de temperatura

El *termopar* se basa en el efecto descubierto por Seebeck en 1821, de la circulación de una corriente en un circuito cerrado formado por dos metales diferentes cuyas uniones (unión de medida o caliente y unión de referencia o fría) se mantienen a distinta temperatura (Fig. 3.33).



**Figura 3.33** Termopar.

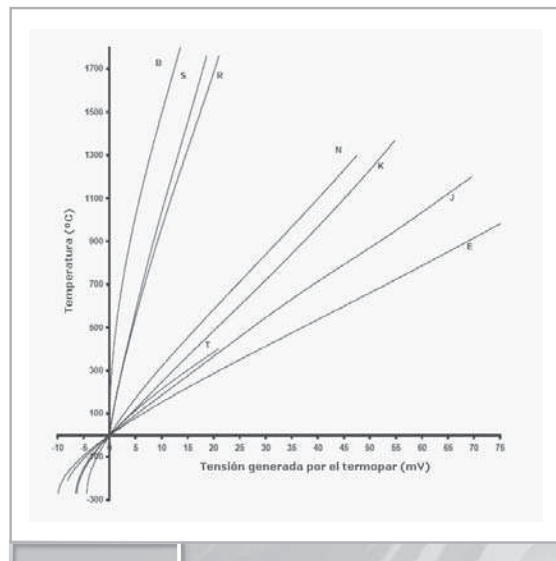
La circulación de corriente indica que en el circuito se desarrolla una pequeña tensión continua proporcional a la temperatura de la unión de medida, siempre que haya una diferencia de temperaturas con la unión de referencia.

En la tabla 3.12 pueden verse los tipos de termopares típicos utilizados en la industria, con sus límites de error.

Tipo	Materiales	Campo medida típico (°C)	Hilo positivo	Hilo negativo	Límites de error estándar (se selecciona el más alto)	Límites de error especial (se selecciona el más alto)
<b>T</b>	Cobre (Cu) - Constantan	-270 a 400	Cobre - azul	Constantan - rojo	> 0° C 1° C o 0,75% < 0° C 2,2° C o 2%	0,5° C o 0,4%
<b>J</b>	Hierro (Fe) - Constantan	-210 a 1200	Hierro - blanco	Constantan - rojo	2,2° C o 0,75%	1,1° C o 0,4%
<b>K</b>	Cromel - Alumel	-270 a 1370	Cromel - amarillo	Alumel - rojo	> 0° C 2,2° C o 0,75% < 0° C 2,2° C o 2%	1,1° C o 0,4%
<b>E</b>	Cromel - Constantan	-270 a 1000	Cromel - púrpura	Constantan - rojo	> 0° C 1,7° C o 0,5% < 0° C 1,7° C o 1%	1° C o 0,4%
<b>S</b>	(Pt-10%Rh) - Pt	-50 a 1768	Pt-10%Rh - negro	Platino - rojo	1,5° C o 0,25%	0,6° C o 0,1%
<b>B</b>	(Pt-13% Rh) - (Pt-6% Rh)	0 a 1820	Pt-13% Rh - gris	Pt-6% Rh - rojo	> 800° C = 0,5%	No establecido
<b>R</b>	(Pt-13%Rh) - Pt	-50 a 1768	Pt-13% Rh - negro	Pt-6% Rh - rojo	1,5° C o 0,25%	0,6° C o 0,1%
<b>N</b>	(Ni-Cr-Si) - (Ni-Si-Mg)	-270 a 1300	(Ni-Cr-Si) - naranja	(Ni-Si-Mg) - rojo	> 0° C 2,2° C o 0,75% < 0° C 2,2° C o 2%	1,1° C o 0,4%

**Tabla 3.12** Termopares típicos utilizados en la industria

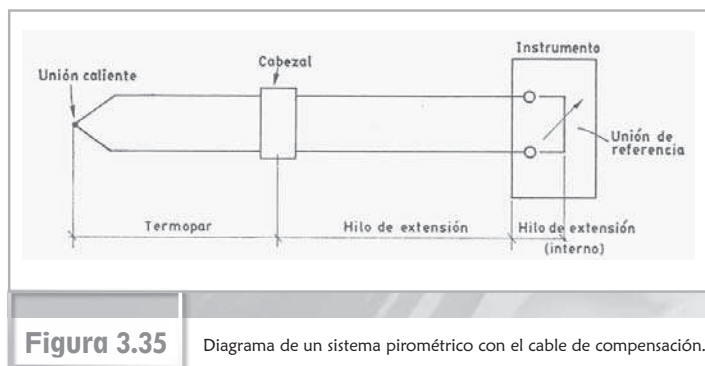
En la figura 3.34 se presentan las curvas características de los termopares, y las f.e.m. correspondientes están tabuladas en tablas de conversión con la unión de referencia a 0 °C (Tabla 3.12).



**Figura 3.34** Curvas f.e.m. de termopares industriales.

Cuando el termopar está instalado a una distancia larga del instrumento no se conecta directamente al mismo, sino por medio de un cable de extensión o compensación (figura 3.35). Los cables de extensión son conductores con propiedades eléctricas similares a las del termopar que prolongan hasta ciertos límites de temperatura (0-200 °C) y son más económicos. El uso del cable de extensión es claro en el caso de termopares tipo R o S debido al elevado precio del platino que encarecería el coste del hilo desde campo hasta el panel. Se suelen utilizar los siguientes conductores:

- Conductores tipo J para termopares tipo J
- Conductores tipo K o tipo T para termopares tipo K
- Conductores tipo T para termopares tipo T
- Conductores tipo E para termopares tipo E
- Conductores cobre-cobre níquel para termopares tipos R, S o B



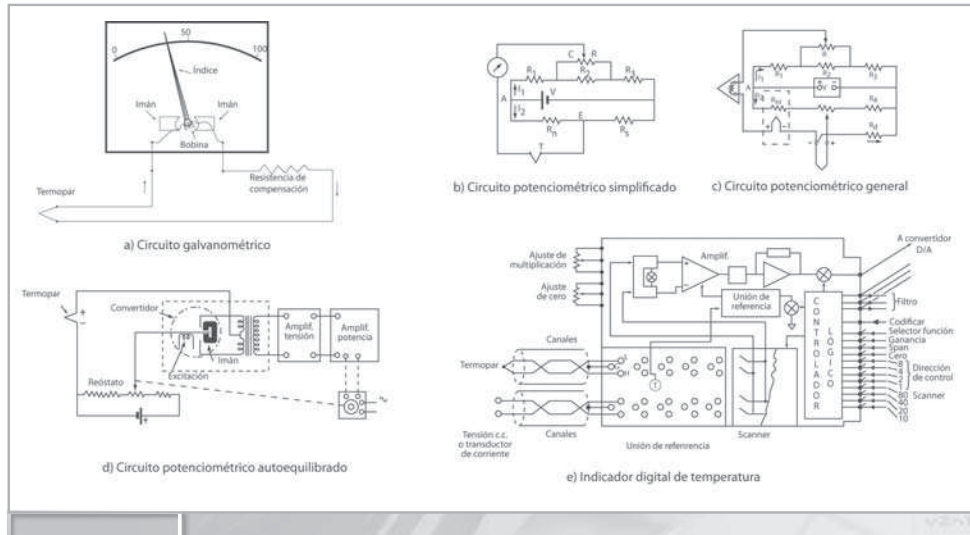
La calibración de los instrumentos clásicos se efectúa con los comprobadores potenciométricos (fig. 3.36). Estos se emplean para comprobar las características f.e.m.- temperatura de los termopares, para medir la temperatura con un termopar y para calibrar los instrumentos galvanométricos y potenciométricos. El aparato puede medir y generar f.e.m. en c.c. En los modelos simples es necesario compensar la temperatura de la unión fría.

Pueden presentarse los siguientes casos:

a) Comprobación del estado de un termopar.

Se sitúa el termopar en un baño de temperaturas o en un horno, según sea la temperatura a comprobar, y se coloca un termómetro de vidrio en la caja del potenciómetro de comprobación y se procede del modo siguiente:

1. Se determina la temperatura de la unión fría o temperatura ambiente  $t_a$  del potenciómetro, por lectura del termómetro de vidrio.
2. Se lee la f.e.m. generada por el termopar en el potenciómetro.
3. En las tablas de f.e.m. referidas a 0 °C se determinan los milivoltios correspondientes a la temperatura de la unión fría.



**Figura 3.36** Circuito potenciométrico y digital de termopar.

4. La suma algebraica de los dos valores anteriores de f.e.m. se pasa al valor correspondiente de temperatura mediante la tabla de f.e.m. correspondiente al termopar.

Los valores se suman ya que dentro del potenciómetro se encuentra la junta fría, y la f.e.m. leída es menor en un valor  $V_a$  (correspondiente a  $t_a$ , a la  $V$  que se obtendría si la unión fría estuviera a  $0^\circ\text{C}$ ).

5. La temperatura obtenida debe corresponder, dentro de los límites de exactitud del termopar, a la temperatura del baño o del horno. En caso de no ser así, el termopar es defectuoso y debe ser sustituido por otro nuevo.

#### Ejemplo:

Sea un termopar tipo J de hierro - constantán o verificar. Conectado el potenciómetro se lee una f.e.m de 38,113 mV. El termómetro de mercurio situado sobre la caja da una temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$ . Consultadas las tablas de conversión (tabla 3.12 termopar tipo J) se encuentra una f.e.m. de 1,019 mV para el termopar tipo J a  $20^\circ\text{C}$ .

La f.e.m. que generaría el termopar con la unión fría a  $0^\circ\text{C}$  sería:

$$38,113 + 1,019 = 39,132 \text{ mV}$$

que en la tabla de conversión corresponde a  $700^\circ\text{C}$ .

Esta es pues la temperatura que otro termopar patrón conectado a otro instrumento patrón debería señalar. De no ser así, el termopar sería defectuoso o estaría envejecido.

- b) Calibración de un instrumento de temperatura galvanométrico o potenciométrico.

Se coloca un termómetro de vidrio en la caja del instrumento y se procede del modo siguiente:

1. Se determina la temperatura de la unión fría del instrumento por lectura del termómetro de vidrio.
2. En las tablas de f.e.m. referidas a 0 °C se determina los milivoltios correspondientes a la temperatura a verificar del instrumento.
3. La diferencia algebraica de los valores anteriores se sitúa en el comprobador, debiendo leer el instrumento la temperatura a verificar. Los valores se restan, ya que el instrumento tiene compensación de temperatura ambiente, y si ésta aumenta, la f.e.m. útil disminuye en el valor correspondiente a la f.e.m. generada por el termopar a esta temperatura, situándose siempre el índice del instrumento en el valor de la temperatura de la unión caliente.

#### Ejemplo:

Sea un instrumento de escala 0 - 700 °C tipo J, con compensación de temperatura ambiente y se trata de comprobarlo para la temperatura de 700 °C. Se conecta el potenciómetro generador de mV al aparato y con un termómetro de mercurio adosado se lee 20 °C. Consultadas las tablas de conversión del termopar tipo J se encuentran los valores siguientes:

$$\begin{array}{rcl}
 \text{F.e.m. correspondiente a } 700 \text{ }^{\circ}\text{C} & = & 39,132 \text{ mV} \\
 \text{F.e.m. correspondiente a } 20 \text{ }^{\circ}\text{C} & = & 1,019 \text{ mV} \\
 \hline
 \text{Diferencia} & = & 38,113 \text{ mV}
 \end{array}$$

Así pues, generando con el potenciómetro una f.e.m. de 38,113 mV el índice (o el valor digital) indicador de la temperatura deberá situarse en 700 °C, si está bien calibrado.

En el caso de potenciómetros con microprocesador, la operación es más sencilla ya que el aparato tiene compensación de temperatura de la unión fría y dispone en memoria de los valores f.e.m./temperatura para los diferentes tipos de termopares industriales o bien de los polinomios de valores de la f.e.m. en función de la temperatura, por lo que bastaría situar directamente bien 700 °C, bien 38, 113 mV.

Estos calibradores típicos tienen las siguientes características (figura 3.35):

Campo de medida (rango) = - 10 mV a + 75 mV.

Resolución = 0,01 mV

Exactitud = 0,25% del campo de medida (rango) + 1 dígito (el menos significativo - LSD = Least significant digit).

Termopares = 10 tipos

Figuran a continuación (tabla 3.13) tablas de valores de f.e.m. en función de la temperatura para los termopares industriales. Los valores están dados con intervalos de 5 °C. La composición de estos termopares es:

Tipo E (cromel - constantan)										
El hilo de cromel es el positivo - Temperatura de referencia 0° C										
0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
-300							-9.835	-9.821	-9.797	-9.762
-250	-9.718	-9.666	-9.604	-9.534	-9.455	-9.368	-9.274	-9.172	-9.063	-8.947
-200	-8.825	-8.696	-8.561	-8.420	-8.273	-8.121	-7.963	-7.800	-7.632	-7.458
-150	-7.279	-7.096	-6.907	-6.714	-6.516	-6.314	-6.107	-5.896	-5.681	-5.461
-100	-5.237	-5.009	-4.777	-4.542	-4.302	-4.058	-3.811	-3.561	-3.306	-3.048
-50	-2.787	-2.523	-2.255	-1.984	-1.709	-1.432	-1.152	-0.868	-0.582	-0.292
0	0.000	0.294	0.591	0.890	1.192	1.495	1.801	2.109	2.420	2.733
50	3.048	3.365	3.685	4.006	4.330	4.656	4.985	5.315	5.648	5.982
100	6.319	6.658	6.998	7.341	7.685	8.031	8.379	8.729	9.081	9.434
150	9.789	10.145	10.503	10.863	11.224	11.587	11.951	12.317	12.684	13.052
200	13.421	13.792	14.164	14.537	14.912	15.287	15.664	16.041	16.420	16.800
250	17.181	17.562	17.945	18.328	18.713	19.098	19.484	19.871	20.259	20.647
300	21.036	21.426	21.817	22.208	22.600	22.993	23.386	23.780	24.174	24.569
350	24.964	25.360	25.757	26.154	26.552	26.950	27.348	27.747	28.146	28.546
400	28.946	29.346	29.747	30.148	30.550	30.952	31.354	31.756	32.159	32.562
450	32.965	33.368	33.772	34.175	34.579	34.983	35.387	35.792	36.196	36.601
500	37.005	37.410	37.815	38.220	38.624	39.029	39.434	39.839	40.243	40.648
550	41.053	41.457	41.862	42.266	42.671	43.075	43.479	43.883	44.286	44.690
600	45.093	45.497	45.900	46.302	46.705	47.107	47.509	47.911	48.313	48.715
650	49.116	49.517	49.917	50.318	50.718	51.118	51.517	51.916	52.315	52.714
700	53.112	53.510	53.908	54.306	54.703	55.100	55.497	55.893	56.289	56.685
750	57.080	57.475	57.870	58.265	58.659	59.053	59.446	59.839	60.232	60.625
800	61.017	61.409	61.801	62.192	62.583	62.974	63.364	63.754	64.144	64.533
850	64.922	65.310	65.698	66.086	66.473	66.860	67.246	67.632	68.017	68.402
900	68.787	69.171	69.554	69.937	70.319	70.701	71.082	71.463	71.844	72.223
950	72.603	72.981	73.360	73.738	74.115	74.492	74.869	75.245	75.621	75.997
1000	76.373									

Tabla 3.13

F.e.m. de termopares industriales.

**Tipo T (cobre - constantan)****El hilo de cobre es el positivo - Temperatura de referencia 0° C**

0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
-300							-6.258	-6.248	-6.232	-6.209
-250	-6.180	-6.146	-6.105	-6.059	-6.007	-5.950	-5.888	-5.823	-5.753	-5.680
-200	-5.603	-5.523	-5.439	-5.351	-5.261	-5.167	-5.070	-4.969	-4.865	-4.759
-150	-4.648	-4.535	-4.419	-4.300	-4.177	-4.052	-3.923	-3.791	-3.657	-3.519
-100	-3.379	-3.235	-3.089	-2.940	-2.788	-2.633	-2.476	-2.316	-2.153	-1.987
-50	-1.819	-1.648	-1.475	-1.299	-1.121	-0.940	-0.757	-0.571	-0.383	-0.193
0	0.000	0.195	0.391	0.589	0.790	0.992	1.196	1.403	1.612	1.823
50	2.036	2.251	2.468	2.687	2.909	3.132	3.358	3.585	3.814	4.046
100	4.279	4.513	4.750	4.988	5.228	5.470	5.714	5.959	6.206	6.454
150	6.704	6.956	7.209	7.463	7.720	7.977	8.237	8.497	8.759	9.023
200	9.288	9.555	9.822	10.092	10.362	10.634	10.907	11.182	11.458	11.735
250	12.013	12.293	12.574	12.856	13.139	13.423	13.709	13.995	14.283	14.572
300	14.862	15.153	15.445	15.738	16.032	16.327	16.624	16.921	17.219	17.518
350	17.819	18.120	18.422	18.725	19.030	19.335	19.641	19.947	20.255	20.563
400	20.872									

**Tipo J (hierro - constantan)****El hilo de hierro es el positivo - Temperatura de referencia 0° C**

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
-250									-8.095	-7.996
-200	-7.890	-7.778	-7.659	-7.534	-7.403	-7.265	-7.123	-6.975	-6.821	-6.663
-150	-6.500	-6.332	-6.159	-5.982	-5.801	-5.616	-5.426	-5.233	-5.037	-4.836
-100	-4.633	-4.425	-4.215	-4.002	-3.786	-3.566	-3.344	-3.120	-2.893	-2.663
-50	-2.431	-2.197	-1.961	-1.722	-1.482	-1.239	-0.995	-0.749	-0.501	-0.251
0	0.000	0.253	0.507	0.762	1.019	1.277	1.537	1.797	2.059	2.322
50	2.585	2.850	3.116	3.382	3.650	3.918	4.187	4.456	4.726	4.997
100	5.269	5.541	5.814	6.087	6.360	6.634	6.909	7.184	7.459	7.734
150	8.010	8.286	8.562	8.839	9.115	9.392	9.669	9.947	10.224	10.501
200	10.779	11.056	11.334	11.612	11.889	12.167	12.445	12.722	13.000	13.278
250	13.555	13.833	14.110	14.388	14.665	14.942	15.219	15.496	15.773	16.050
300	16.327	16.604	16.881	17.157	17.434	17.710	17.986	18.262	18.538	18.814
350	19.090	19.366	19.642	19.918	20.194	20.469	20.745	21.021	21.297	21.572
400	21.848	22.124	22.400	22.676	22.952	23.228	23.504	23.780	24.057	24.333
450	24.610	24.887	25.164	25.442	25.720	25.998	26.276	26.555	26.834	27.113
500	27.393	27.673	27.953	28.234	28.516	28.798	29.080	29.363	29.647	29.931
550	30.216	30.502	30.788	31.074	31.362	31.650	31.939	32.229	32.519	32.810
600	33.102	33.395	33.689	33.984	34.279	34.575	34.873	35.171	35.470	35.770
650	36.071	36.373	36.675	36.979	37.284	37.590	37.896	38.204	38.512	38.822
700	39.132	39.443	39.755	40.068	40.382	40.696	41.012	41.328	41.645	41.962
750	42.281	42.599	42.919	43.239	43.559	43.881	44.203	44.525	44.848	45.171

<b>800</b>	45.494	45.818	46.141	46.464	46.786	47.109	47.431	47.753	48.074	48.395
<b>850</b>	48.715	49.034	49.353	49.672	49.989	50.306	50.622	50.937	51.251	51.565
<b>900</b>	51.877	52.189	52.500	52.810	53.119	53.427	53.735	54.041	54.347	54.652
<b>950</b>	54.956	55.259	55.561	55.863	56.164	56.464	56.763	57.062	57.360	57.657
<b>1000</b>	57.953	58.249	58.545	58.840	59.134	59.428	59.721	60.014	60.307	60.599
<b>1050</b>	60.890	61.182	61.473	61.763	62.054	62.344	62.634	62.924	63.214	63.503
<b>1100</b>	63.792	64.081	64.370	64.659	64.948	65.237	65.525	65.814	66.102	66.391
<b>1150</b>	66.679	66.967	67.255	67.543	67.831	68.119	68.406	68.693	68.980	69.267
<b>1200</b>	69.553									

<b>Termopar tipo K (cromel - alumel)</b>										
El hilo de cromel es el positivo - Temperatura de referencia 0° C										
	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>
<b>-300</b>							-6.458	-6.452	-6.441	-6.425
<b>-250</b>	-6.404	-6.377	-6.344	-6.306	-6.262	-6.213	-6.158	-6.099	-6.035	-5.965
<b>-200</b>	-5.891	-5.813	-5.730	-5.642	-5.550	-5.454	-5.354	-5.250	-5.141	-5.029
<b>-150</b>	-4.913	-4.793	-4.669	-4.542	-4.411	-4.276	-4.138	-3.997	-3.852	-3.705
<b>-100</b>	-3.554	-3.400	-3.243	-3.083	-2.920	-2.755	-2.587	-2.416	-2.243	-2.067
<b>-50</b>	-1.889	-1.709	-1.527	-1.343	-1.156	-0.968	-0.778	-0.586	-0.392	-0.197
<b>0</b>	0.000	0.198	0.397	0.597	0.798	1.000	1.203	1.407	1.612	1.817
<b>50</b>	2.023	2.230	2.436	2.644	2.851	3.059	3.267	3.474	3.682	3.889
<b>100</b>	4.096	4.303	4.509	4.715	4.920	5.124	5.328	5.532	5.735	5.937
<b>150</b>	6.138	6.339	6.540	6.741	6.941	7.140	7.340	7.540	7.739	7.939
<b>200</b>	8.138	8.338	8.539	8.739	8.940	9.141	9.343	9.545	9.747	9.950
<b>250</b>	10.153	10.357	10.561	10.766	10.971	11.176	11.382	11.588	11.795	12.001
<b>300</b>	12.209	12.416	12.624	12.831	13.040	13.248	13.457	13.665	13.874	14.084
<b>350</b>	14.293	14.503	14.713	14.923	15.133	15.343	15.554	15.764	15.975	16.186
<b>400</b>	16.397	16.608	16.820	17.031	17.243	17.455	17.667	17.879	18.091	18.303
<b>450</b>	18.516	18.728	18.941	19.154	19.366	19.579	19.792	20.005	20.218	20.431
<b>500</b>	20.644	20.857	21.071	21.284	21.497	21.710	21.924	22.137	22.350	22.563
<b>550</b>	22.776	22.990	23.203	23.416	23.629	23.842	24.055	24.267	24.480	24.693
<b>600</b>	24.905	25.118	25.330	25.543	25.755	25.967	26.179	26.390	26.602	26.814
<b>650</b>	27.025	27.236	27.447	27.658	27.869	28.079	28.289	28.500	28.710	28.919
<b>700</b>	29.129	29.338	29.548	29.757	29.965	30.174	30.382	30.590	30.798	31.006
<b>750</b>	31.213	31.421	31.628	31.834	32.041	32.247	32.453	32.659	32.865	33.070
<b>800</b>	33.275	33.480	33.685	33.889	34.093	34.297	34.501	34.704	34.908	35.110
<b>850</b>	35.313	35.516	35.718	35.920	36.121	36.323	36.524	36.725	36.925	37.126
<b>900</b>	37.326	37.526	37.725	37.925	38.124	38.323	38.522	38.720	38.918	39.116
<b>950</b>	39.314	39.511	39.708	39.905	40.101	40.298	40.494	40.690	40.885	41.081
<b>1000</b>	41.276	41.470	41.665	41.859	42.053	42.247	42.440	42.633	42.826	43.019
<b>1050</b>	43.211	43.403	43.595	43.787	43.978	44.169	44.359	44.550	44.740	44.929
<b>1100</b>	45.119	45.308	45.497	45.685	45.873	46.061	46.249	46.436	46.623	46.809
<b>1150</b>	46.995	47.181	47.367	47.552	47.737	47.921	48.105	48.289	48.473	48.656
<b>1200</b>	48.838	49.021	49.202	49.384	49.565	49.746	49.926	50.106	50.286	50.465
<b>1250</b>	50.644	50.822	51.000	51.178	51.355	51.532	51.708	51.885	52.060	52.235
<b>1300</b>	52.410	52.585	52.759	52.932	53.106	53.279	53.451	53.623	53.795	53.967
<b>1350</b>	54.138	54.308	54.479	54.649	54.819					

<b>Tipo R (platino/13% rodio - platino)</b>										
<b>El hilo de platino/13% rodio es el positivo - Temperatura de referencia 0° C</b>										
<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	
<b>-50</b>	-0.226	-0.208	-0.188	-0.167	-0.145	-0.123	-0.100	-0.076	-0.051	-0.026
<b>0</b>	0.000	0.027	0.054	0.082	0.111	0.141	0.171	0.201	0.232	0.264
<b>50</b>	0.296	0.329	0.363	0.397	0.431	0.466	0.501	0.537	0.573	0.610
<b>100</b>	0.647	0.685	0.723	0.761	0.800	0.839	0.879	0.919	0.959	1.000
<b>150</b>	1.041	1.082	1.124	1.166	1.208	1.251	1.294	1.337	1.381	1.425
<b>200</b>	1.469	1.513	1.558	1.602	1.648	1.693	1.739	1.784	1.831	1.877
<b>250</b>	1.923	1.970	2.017	2.064	2.112	2.159	2.207	2.255	2.304	2.352
<b>300</b>	2.401	2.449	2.498	2.547	2.597	2.646	2.696	2.746	2.796	2.846
<b>350</b>	2.896	2.947	2.997	3.048	3.099	3.150	3.201	3.253	3.304	3.356
<b>400</b>	3.408	3.460	3.512	3.564	3.616	3.669	3.721	3.774	3.827	3.880
<b>450</b>	3.933	3.986	4.040	4.093	4.147	4.201	4.255	4.309	4.363	4.417
<b>500</b>	4.471	4.526	4.580	4.635	4.690	4.745	4.800	4.855	4.910	4.966
<b>550</b>	5.021	5.077	5.133	5.189	5.245	5.301	5.357	5.414	5.470	5.527
<b>600</b>	5.583	5.640	5.697	5.754	5.812	5.869	5.926	5.984	6.041	6.099
<b>650</b>	6.157	6.215	6.273	6.332	6.390	6.448	6.507	6.566	6.625	6.684
<b>700</b>	6.743	6.802	6.861	6.921	6.980	7.040	7.100	7.160	7.220	7.280
<b>750</b>	7.340	7.401	7.461	7.522	7.583	7.644	7.705	7.766	7.827	7.888
<b>800</b>	7.950	8.011	8.073	8.135	8.197	8.259	8.321	8.384	8.446	8.509
<b>850</b>	8.571	8.634	8.697	8.760	8.823	8.887	8.950	9.014	9.077	9.141
<b>900</b>	9.205	9.269	9.333	9.397	9.461	9.526	9.590	9.655	9.720	9.785
<b>950</b>	9.850	9.915	9.980	10.046	10.111	10.177	10.242	10.308	10.374	10.440
<b>1000</b>	10.506	10.572	10.638	10.705	10.771	10.838	10.905	10.972	11.039	11.106
<b>1050</b>	11.173	11.240	11.307	11.375	11.442	11.510	11.578	11.646	11.714	11.782
<b>1100</b>	11.850	11.918	11.986	12.054	12.123	12.191	12.260	12.329	12.397	12.466
<b>1150</b>	12.535	12.604	12.673	12.742	12.812	12.881	12.950	13.019	13.089	13.158
<b>1200</b>	13.228	13.298	13.367	13.437	13.507	13.577	13.646	13.716	13.786	13.856
<b>1250</b>	13.926	13.996	14.066	14.137	14.207	14.277	14.347	14.418	14.488	14.558
<b>1300</b>	14.629	14.699	14.770	14.840	14.911	14.981	15.052	15.122	15.193	15.263
<b>1350</b>	15.334	15.404	15.475	15.546	15.616	15.687	15.758	15.828	15.899	15.969
<b>1400</b>	16.040	16.111	16.181	16.252	16.323	16.393	16.464	16.534	16.605	16.676
<b>1450</b>	16.746	16.817	16.887	16.958	17.028	17.099	17.169	17.240	17.310	17.380
<b>1500</b>	17.451	17.521	17.591	17.661	17.732	17.802	17.872	17.942	18.012	18.082
<b>1550</b>	18.152	18.222	18.292	18.362	18.431	18.501	18.571	18.640	18.710	18.779
<b>1600</b>	18.849	18.918	18.988	19.057	19.126	19.195	19.264	19.333	19.402	19.471
<b>1650</b>	19.540	19.609	19.677	19.746	19.814	19.882	19.951	20.019	20.087	20.154
<b>1700</b>	20.222	20.289	20.356	20.422	20.488	20.554	20.620	20.685	20.749	20.813
<b>1750</b>	20.877	20.940	21.003	21.065						

<b>Tipo 5 (platino - platino 10%-rodio)</b>										
<b>El hilo de platino es el positivo - Temperatura de referencia 0° C</b>										
<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	
<b>-50</b>	-0.236	-0.215	-0.194	-0.173	-0.150	-0.127	-0.103	-0.078	-0.053	-0.027
<b>0</b>	0.000	0.027	0.055	0.084	0.113	0.143	0.173	0.204	0.235	0.267
<b>50</b>	0.299	0.332	0.365	0.399	0.433	0.467	0.502	0.538	0.573	0.609
<b>100</b>	0.646	0.683	0.720	0.758	0.795	0.834	0.872	0.911	0.950	0.990
<b>150</b>	1.029	1.069	1.110	1.150	1.191	1.232	1.273	1.315	1.357	1.399
<b>200</b>	1.441	1.483	1.526	1.569	1.612	1.655	1.698	1.742	1.786	1.829
<b>250</b>	1.874	1.918	1.962	2.007	2.052	2.096	2.141	2.187	2.232	2.277
<b>300</b>	2.323	2.369	2.415	2.461	2.507	2.553	2.599	2.646	2.692	2.739
<b>350</b>	2.786	2.833	2.880	2.927	2.974	3.021	3.069	3.116	3.164	3.212
<b>400</b>	3.259	3.307	3.355	3.403	3.451	3.500	3.548	3.596	3.645	3.694
<b>450</b>	3.742	3.791	3.840	3.889	3.938	3.987	4.036	4.085	4.134	4.184
<b>500</b>	4.233	4.283	4.332	4.382	4.432	4.482	4.532	4.582	4.632	4.682
<b>550</b>	4.732	4.782	4.833	4.883	4.934	4.984	5.035	5.086	5.137	5.188
<b>600</b>	5.239	5.290	5.341	5.392	5.443	5.495	5.546	5.598	5.649	5.701
<b>650</b>	5.753	5.805	5.857	5.909	5.961	6.013	6.065	6.118	6.170	6.223
<b>700</b>	6.275	6.328	6.381	6.434	6.486	6.539	6.593	6.646	6.699	6.752
<b>750</b>	6.806	6.859	6.913	6.967	7.020	7.074	7.128	7.182	7.236	7.291
<b>800</b>	7.345	7.399	7.454	7.508	7.563	7.618	7.673	7.728	7.783	7.838
<b>850</b>	7.893	7.948	8.003	8.059	8.114	8.170	8.226	8.281	8.337	8.393
<b>900</b>	8.449	8.505	8.562	8.618	8.674	8.731	8.787	8.844	8.900	8.957
<b>950</b>	9.014	9.071	9.128	9.185	9.242	9.300	9.357	9.414	9.472	9.529
<b>1000</b>	9.587	9.645	9.703	9.761	9.819	9.877	9.935	9.993	10.051	10.110
<b>1050</b>	10.168	10.227	10.285	10.344	10.403	10.461	10.520	10.579	10.638	10.697
<b>1100</b>	10.757	10.816	10.875	10.934	10.994	11.053	11.113	11.172	11.232	11.291
<b>1150</b>	11.351	11.411	11.471	11.531	11.590	11.650	11.710	11.770	11.830	11.890
<b>1200</b>	11.951	12.011	12.071	12.131	12.191	12.252	12.312	12.372	12.433	12.493
<b>1250</b>	12.554	12.614	12.675	12.735	12.796	12.856	12.917	12.977	13.038	13.098
<b>1300</b>	13.159	13.220	13.280	13.341	13.402	13.462	13.523	13.584	13.644	13.705
<b>1350</b>	13.766	13.826	13.887	13.948	14.009	14.069	14.130	14.191	14.251	14.312
<b>1400</b>	14.373	14.433	14.494	14.554	14.615	14.676	14.736	14.797	14.857	14.918
<b>1450</b>	14.978	15.039	15.099	15.160	15.220	15.280	15.341	15.401	15.461	15.521
<b>1500</b>	15.582	15.642	15.702	15.762	15.822	15.882	15.942	16.002	16.062	16.122
<b>1550</b>	16.182	16.241	16.301	16.361	16.420	16.480	16.539	16.599	16.658	16.718
<b>1600</b>	16.777	16.836	16.895	16.954	17.013	17.072	17.131	17.190	17.249	17.308
<b>1650</b>	17.366	17.425	17.483	17.542	17.600	17.658	17.717	17.775	17.832	17.890
<b>1700</b>	17.947	18.004	18.061	18.118	18.174	18.230	18.285	18.341	18.395	18.449
<b>1750</b>	18.503	18.557	18.609	18.661						

<b>Tipo B (platino/30% rodio - platino/10% rodio)</b>										
<b>El hilo de platino/30% rodio es el positivo - Temperatura de referencia 0° C</b>										
<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>40</b>	<b>45</b>	
<b>0</b>	0.000	-0.001	-0.002	-0.002	-0.003	-0.002	-0.002	-0.001	0.000	0.001
<b>50</b>	0.002	0.004	0.006	0.009	0.011	0.014	0.017	0.021	0.025	0.029
<b>100</b>	0.033	0.038	0.043	0.048	0.053	0.059	0.065	0.072	0.078	0.085
<b>150</b>	0.092	0.099	0.107	0.115	0.123	0.132	0.141	0.150	0.159	0.168
<b>200</b>	0.178	0.188	0.199	0.209	0.220	0.231	0.243	0.255	0.267	0.279
<b>250</b>	0.291	0.304	0.317	0.330	0.344	0.358	0.372	0.386	0.401	0.416
<b>300</b>	0.431	0.446	0.462	0.478	0.494	0.510	0.527	0.544	0.561	0.578
<b>350</b>	0.596	0.614	0.632	0.650	0.669	0.688	0.707	0.727	0.746	0.766
<b>400</b>	0.787	0.807	0.828	0.849	0.870	0.891	0.913	0.935	0.957	0.979
<b>450</b>	1.002	1.025	1.048	1.071	1.095	1.119	1.143	1.167	1.192	1.217
<b>500</b>	1.242	1.267	1.293	1.318	1.344	1.371	1.397	1.424	1.451	1.478
<b>550</b>	1.505	1.533	1.561	1.589	1.617	1.646	1.675	1.704	1.733	1.762
<b>600</b>	1.792	1.822	1.852	1.882	1.913	1.944	1.975	2.006	2.037	2.069
<b>650</b>	2.101	2.133	2.165	2.197	2.230	2.263	2.296	2.329	2.363	2.397
<b>700</b>	2.431	2.465	2.499	2.534	2.569	2.604	2.639	2.674	2.710	2.746
<b>750</b>	2.782	2.818	2.854	2.891	2.928	2.965	3.002	3.040	3.078	3.116
<b>800</b>	3.154	3.192	3.230	3.269	3.308	3.347	3.386	3.426	3.466	3.506
<b>850</b>	3.546	3.586	3.626	3.667	3.708	3.749	3.790	3.832	3.873	3.915
<b>900</b>	3.957	3.999	4.041	4.084	4.127	4.170	4.213	4.256	4.299	4.343
<b>950</b>	4.387	4.431	4.475	4.519	4.564	4.608	4.653	4.698	4.743	4.789
<b>1000</b>	4.834	4.880	4.926	4.972	5.018	5.065	5.111	5.158	5.205	5.252
<b>1050</b>	5.299	5.346	5.394	5.441	5.489	5.537	5.585	5.634	5.682	5.731
<b>1100</b>	5.780	5.828	5.878	5.927	5.976	6.026	6.075	6.125	6.175	6.225
<b>1150</b>	6.276	6.326	6.377	6.427	6.478	6.529	6.580	6.632	6.683	6.735
<b>1200</b>	6.786	6.838	6.890	6.942	6.995	7.047	7.100	7.152	7.205	7.258
<b>1250</b>	7.311	7.364	7.417	7.471	7.524	7.578	7.632	7.686	7.740	7.794
<b>1300</b>	7.848	7.903	7.957	8.012	8.066	8.121	8.176	8.231	8.286	8.342
<b>1350</b>	8.397	8.453	8.508	8.564	8.620	8.675	8.731	8.787	8.844	8.900
<b>1400</b>	8.956	9.013	9.069	9.126	9.182	9.239	9.296	9.353	9.410	9.467
<b>1450</b>	9.524	9.581	9.639	9.696	9.753	9.811	9.868	9.926	9.984	10.041
<b>1500</b>	10.099	10.157	10.215	10.273	10.331	10.389	10.447	10.505	10.563	10.621
<b>1550</b>	10.679	10.738	10.796	10.854	10.913	10.971	11.029	11.088	11.146	11.205
<b>1600</b>	11.263	11.321	11.380	11.438	11.497	11.555	11.614	11.673	11.731	11.790
<b>1650</b>	11.848	11.907	11.965	12.024	12.082	12.141	12.199	12.257	12.316	12.374
<b>1700</b>	12.433	12.491	12.549	12.607	12.666	12.724	12.782	12.840	12.898	12.956



### 3.6.5 Calibración de pirómetros de radiación

Los *pirómetros de radiación* captan la intensidad de energía radiante  $W$  emitida por la superficie de un cuerpo, que es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta (Kelvin) del cuerpo, es decir,  $W = ET^4$ .

Enfocando el pirómetro de radiación a un orificio practicado en un horno, se dice que el cuerpo enfocado está en condiciones de cuerpo negro, ya que absorbe todas las radiaciones y no emite ninguna, y por tanto su coeficiente de emisión es la unidad.

El *coeficiente de emisión o emisividad* de un cuerpo es la relación entre la energía radiante emitida por un cuerpo y la de un cuerpo negro que se encuentra a la misma temperatura y en las mismas condiciones de servicio.

Los pirómetros de radiación se calibran con relación a cuerpos negros (emisividad = 1), por lo que marcarán incorrectamente al enfocar cuerpos con emisividad menor de 1, y por ello dispones de un ajuste del coeficiente de emisividad.

El *pirómetro de radiación total* está formado por una lente de pyrex, sílice o fluoruro de calcio que concentra la radiación del objeto caliente en una termopila formada por varios termopares de Pt-Pt/Rh, de pequeñas dimensiones y montados en serie.

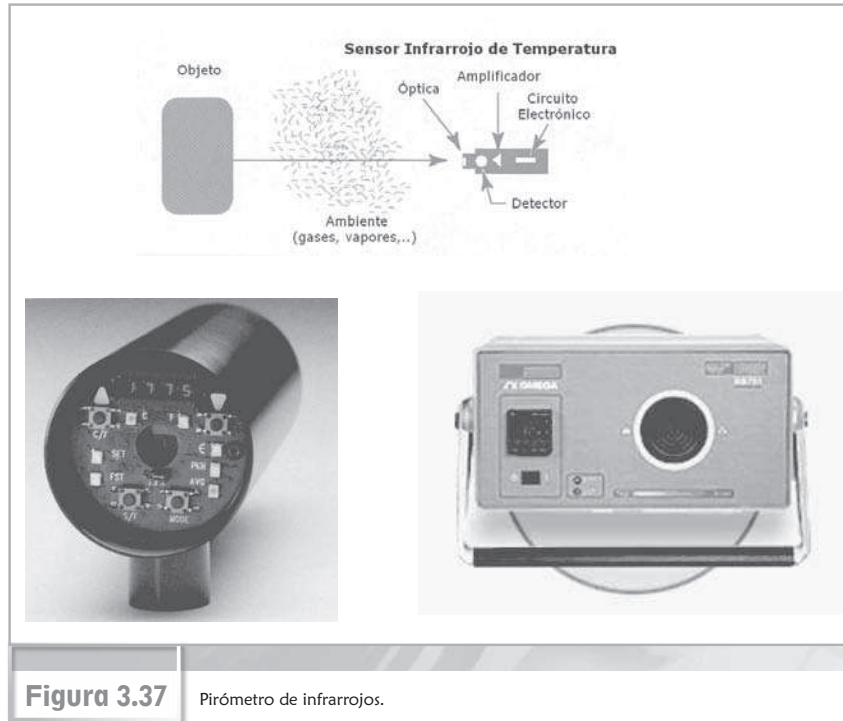
El *pirómetro de infrarrojos* capta la radiación espectral del infrarrojo, invisible al ojo humano, y puede medir temperaturas menores que 700 °C, supliendo al pirómetro óptico que sólo puede trabajar eficazmente a temperaturas superiores a 700 °C, donde la radiación visible emitida es significativa. Las temperaturas medidas abarcan desde valores inferiores a 0 °C hasta más de 2.000 °C.

En la figura 3.37 puede verse un esquema del pirómetro de infrarrojos. La lente filtra la radiación infrarroja emitida por el área del objeto examinado y la concentra en un detector (silicio, sulfuro de plomo, indio antimonio o indio galio arsénico) que la convierte en una señal de corriente y a través de un algoritmo interno del instrumento y de la emisividad del cuerpo enfocado, la pasa a un valor de temperatura. La señal de salida puede ser analógica (4 - 20 mA cc) o digital.

El aparato dispone de un compensador de emisividad que permite corregir la temperatura leída. Su respuesta es más rápida que la de los termopares alcanzando 95% del valor final entre 5 a 100 ms. La exactitud según ITS90 es de  $\pm 0,4\%$  K.

Existen cámaras infrarrojas termográficas que permiten almacenar imágenes termográficas con su distribución de temperaturas, y procesarlas en ordenador, lo que es de interés en mantenimiento preventivo y predictivo en la industria. El campo de medida es de 0 °C hasta 350 °C, alcanzando los 1200 °C con una exactitud de  $\pm 2\%$ .

El pirómetro de relación, o de dos colores, dispone de un selector de relación de emisividades y puede indicar la temperatura real del objeto con una gran exactitud. Su empleo es excelente en los llamados cuerpos grises, es decir, aquellos cuyo coeficiente de emisión es constante para todas las longitudes de onda y permite medir a través de atmósfera de humos, vapor y polvo ya que, por su principio de funcionamiento, la lectura es teóricamente independiente de la absorción de la atmósfera intermedia.



**Figura 3.37** Pirómetro de infrarrojos.

Es fácil usar incorrectamente el pirómetro de radiación ante los problemas potenciales que presenta el campo de visión, las reflexiones, la absorción de vapores, gases, humos o materiales transparentes que se interponen en el camino del haz de enfoque y las emisividades desconocidas. Sin embargo, si las condiciones del proceso son repetitivas, por ejemplo en un horno túnel de cerámica, y los análisis en laboratorio del producto final (ladrillos, azulejos) indican que el producto está bien fabricado, no tendrá demasiada importancia que la temperatura indicada por el pirómetro no sea la real. Bastará trabajar siempre con la misma indicación para el tipo de material determinado.

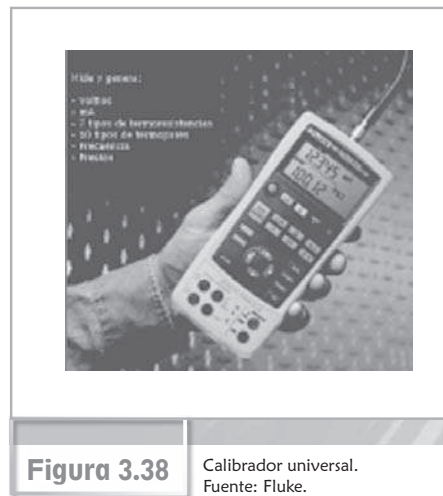
La calibración se consigue enfocando el orificio de un horno de calibración y siguiendo las instrucciones dadas en el manual del fabricante (ajustes de cero y multiplicación, coeficientes de emisividad, etc.)

El calibrador de cuerpo negro permite calibrar pirómetros de infrarrojos. Consiste en una placa blanca con una alta emisividad, cuya temperatura puede ajustarse a tolerancias muy estrechas. La calibración se lleva a cabo enfocando el pirómetro la placa blanca y efectuando una medida. Luego el pirómetro se ajusta hasta que la diferencia sea mínima.

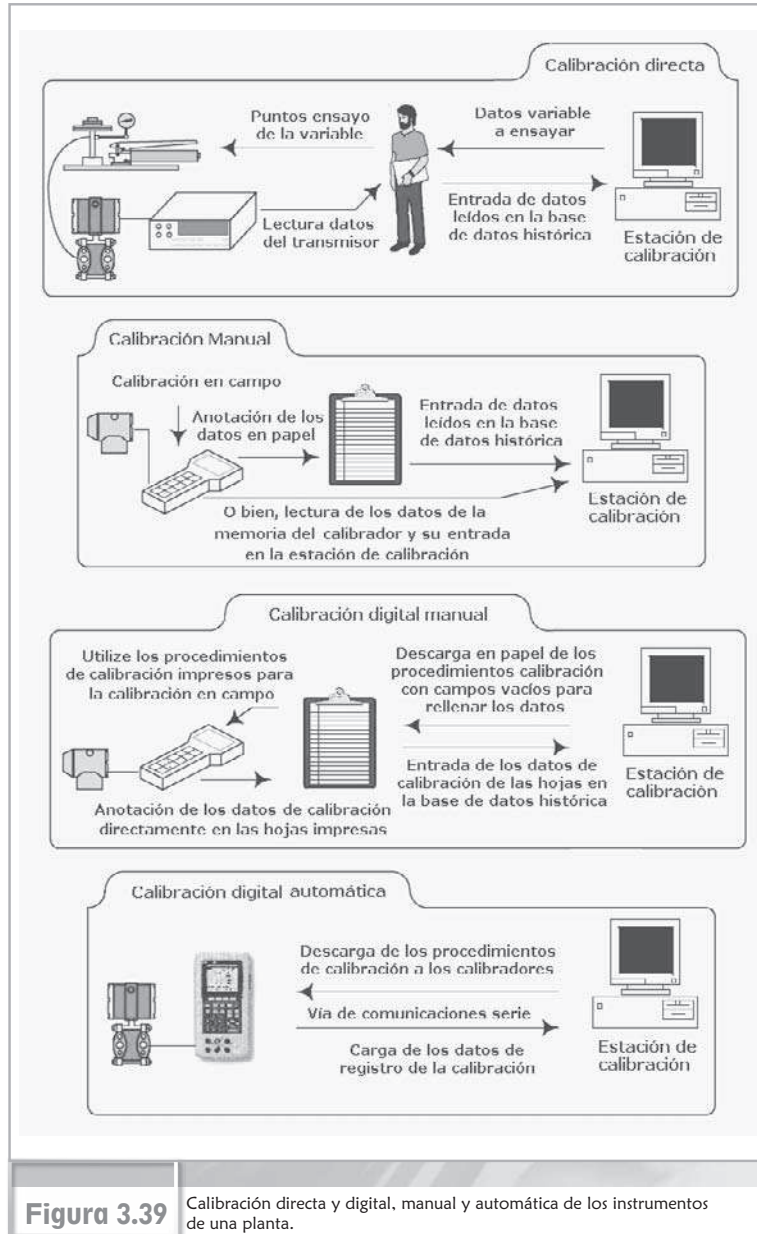
### 3.6.6 Calibradores universales de temperatura

Los *calibradores universales* de temperatura (fig. 3.38) reúnen en un solo aparato las características de los comprobadores potenciométricos y de puente de Wheatstone descritos, midiendo y generando señales de termopar, termorresistencia, ohm, mV, V y mA. Permiten la calibración de los instrumentos digitales de temperatura.

Son muy precisos ( $\pm 0,02\%$ ) y pueden estar dotados de capacidad de comunicación RS232 con un ordenador. Un programa de calibración guía directamente al operador proporcionándole las instrucciones de calibración necesarias. Los resultados documentados cumplen los requisitos de la norma de calidad ISO 9000.



En la figura 3.39 se presenta una forma de calibración automática y manual que puede llevarse a cabo en una planta por medio de con la posibilidad de grabar los datos y seguir un mantenimiento predictivo y preventivo de los instrumentos de la planta.



En la tabla 3.14 pueden verse las calibraciones típicas de temperatura que pueden realizar los centros acreditados.

Calibraciones en el Laboratorio			
MAGNITUD	INSTRUMENTOS A CALIBRAR	CAMPO DE MEDIDA	INCERTIDUMBRE
Temperatura	Resistencia termométrica de Platino	Punto Triple del Mercurio (- 38,8344 °C)	0.004 °C
		Punto Triple del Agua (0,01 °C)	0.002°C
		Punto de fusión del Galio (29,7646 °C)	0.004°C
		Punto de solidificación del Indio (156,5985 °C)	0.005°C
		Punto de solidificación del Estaño (231,928 °C)	0.006°C
		Punto de solidificación del Zinc (419,527 °C)	0.008°C
		Punto Triple del Agua (0,01 °C)	0'05 °C
		-40 °C a 250 °C	0'015 °C
	>250 °C a 420 °C	0'035 °C	
	-40 °C a 250 °C	0'02°C	
	Termómetros de lectura directa con sensor de resistencia termométrica	>250 °C a 420 °C	0'04°C
	Termopares de metal noble	-40 °C a 420 °C	0'5 °C
		>420 °C a 1085 °C	1'0° C
	Termopares de metal común	-40 °C a 420 °C	0'5 °C
		>420 °C a 1085 °C	1'5 °C
	Termómetros de columna de líquido para inmersión total	Punto de fusión del hielo (0'00 °C)	0'02 °C
		-40 °C a < 0 °C	0'08°C
		> 0 °C a 50 °C	0'05 °C
		> 50 °C a 150 °C	0'10 °C
	Termómetros de lectura directa con sonda de termopar	-40 °C a 420 °C	0'8 °C
>420 °C a 1085 °C		1'2 °C	
Termómetros de lectura directa con otros sensores	-40 °C a 250 °C	0.2 °C	
	Termómetros de radiación de infrarrojos. Tamaños de blanco < 15 mm diámetro	50 °C a 420 °C (8-14 μm)	3 °C
		>420 °C a 950 °C (8-14 μm)	4 °C
Temperatura (en aire)	Termómetros de lectura directa con sensor de resistencia termométrica	0 °C a 50 °C	0.3 °C
Calibraciones "in situ"			
MAGNITUD	INSTRUMENTOS A CALIBRAR	CAMPO DE MEDIDA	INCERTIDUMBRE
Temperatura	Termómetros de lectura directa con sensor de resistencia Pt	-40 °C a 100 °C	0'2 °C
		>100 °C a 420 °C	0'5 °C
	Termómetros de lectura directa con sensor de termopar	-40 °C a 420 °C	1 °C
		>420 °C a 1085°C	3 °C

**Tabla 3.14**

Calibraciones típicas de temperatura de centros acreditados.  
Fuente: Termocal.

Se presenta una calibración típica realizada en un centro acreditado de un termómetro ASTM 63C, de escala -8 °C a 32 °C con divisiones de 1 °C.

Temperatura de ensayo	Lectura	Corrección	Tolerancia	¿Está dentro de la tolerancia?	Incertidumbre
-7,00	-6,97	-0,03	0,1	Sí	0,019
0,00	0,02	-0,02	0,1	Sí	0,013
10,00	10,04	-0,04	0,1	SÍ	0,019
20,00	20,02	-0,02	0,1	Sí	0,019
30,00	30,02	-0,02	0,1	Sí	0,019

*Medidas vistas con ampliación y con resolución 1/10 de una división de la escala*

**Tabla 3.15**

Resultado de la calibración de un termómetro de escala -8 °C a 32°C, según ISO/IEC 17025.  
Fuente: ICL (Calibration Laboratories Inc.)

### 3.7 Calibración de instrumentos para otras variables

La calibración de los instrumentos que miden las variables físicas y químicas se realiza básicamente de modo análogo al descrito en la calibración general de los instrumentos, variando sólo el sistema de simulación. Como es natural, se recomienda consultar el manual del fabricante que suele indicar el procedimiento particular de calibración para su instrumento.

**Figura 3.40**

Sensores y registrador.  
Fuente: Honeywell.

Existe la tendencia a agrupar los sensores de las variables a analizar y registrarlas en un único registrador digital. Los sensores pueden medir pH, ORP, conductividad y resistividad, oxígeno disuelto, pureza del hidrógeno y otras variables, siendo las aplicaciones típicas tratamiento de aguas, secado industrial, hornos de tratamiento térmico, corrosión, etc. Los datos registrados pueden tratarse después en hojas electrónicas tipo Excel para su análisis.

En la tabla 3.16 puede verse un resumen de simulación de variables físicas y químicas.

<b>Medidas de peso</b>	
Balanza	Pesos patrones
Báscula	Pesos patrones
Galgas extensométricas	Resistencias patrón que alimentan el puente de Wheatstone correspondiente. Puede variarse el cero y el cien
Célula hidráulica	Relación entre la presión del circuito y el peso
<b>Medidas de velocidad</b>	
Tacómetro mecánico	Comprobación aproximada mediante un estroboscopio.
Tacómetro de corrientes parásitas	
Tacómetro de corriente alterna	
Dinamo tacométrica	
<b>Medidas de densidad</b>	
Areómetro	Por sumersión en líquidos de densidad conocida
Presión diferencial	Igual a la de los transmisores de presión diferencial
Desplazamiento	Igual a la de los transmisores de nivel de desplazamiento
Refractómetro	Líquidos de densidad conocida
Radiación	Líquidos de densidad conocida
Punto de ebullición	Por diferencia de temperaturas
Ultrasonidos	Líquidos de densidad conocida
Medidores inerciales	Líquidos de densidad conocida
<b>Medida de viscosidad</b>	
Par de resistencia de una taza	Ensayo de los instrumentos con líquidos de viscosidad conocida determinada en laboratorio con el sistema de tiempo de descarga
Presión diferencial en un tubo capilar	
Par de torsión de un elemento	
Rotámetro con flotador sensible	
Ultrasonidos	
<b>Medida de consistencia</b>	
Disco rotativo	Ensayo de los instrumentos con líquidos de consistencia conocida determinada en laboratorio con el sistema de distancia recorrida en una pendiente
Paletas rotativas	
Paleta con transductor	
<b>Medida de variables químicas</b>	
Conductividad	Soluciones patrón
pH	
Redox	
Conductividad térmica	Gases patrones
Cromatógrafo	Muestras patrón
Analizador de infrarojos	

**Tabla 3.16**

Simulación de variables físicas y químicas



# Capítulo

# 4

## Calibración de válvulas de control

### 4.1 Generalidades

Los instrumentos de las variables estudiadas en el capítulo anterior envían una señal al controlador, que la compara con el punto de consigna y envía otra señal neumática, electrónica o digital, que posiciona la válvula de control directamente o a través de un convertidor electroneumático o dígitoneumático (figura 4.1).

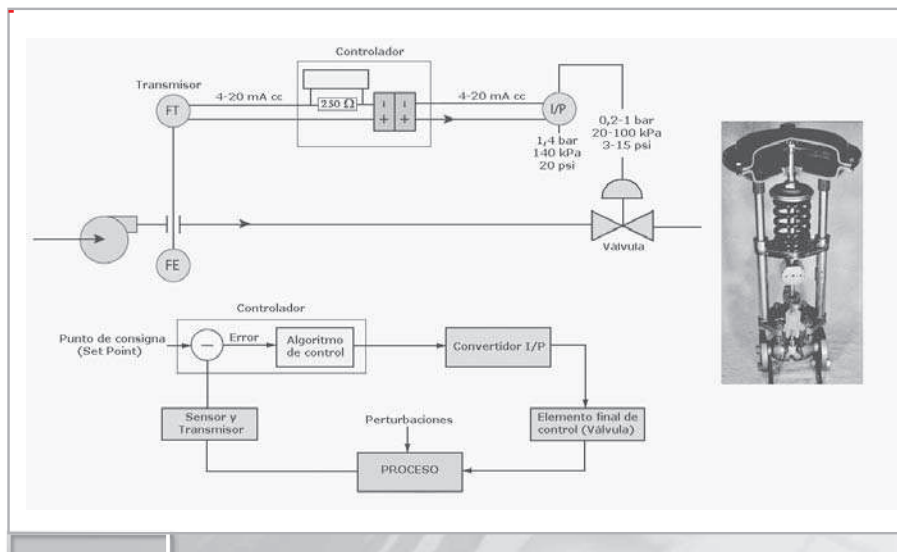


Figura 4.1

Esquema del lazo de control.

Para que el lazo de control funcione correctamente los elementos del lazo de control deben estar bien calibrados:

- Sensor y transmisor electrónico con señal de salida 4 – 20 mA c.c.
- Controlador electrónico con su algoritmo de control (todo-nada, proporcional, proporcional + integral, proporcional + integral + derivativo)
- Convertidor I/P que pasa de 4 – 20 mA cc a señal neumática de 0,2 – 1 bar (20 – 100 kPa) (3 – 15 psi).
- Elemento final de control (válvula) que recibe la señal neumática y mueve el obturador con relación al asiento para modificar el proceso y el nuevo valor de la variable de proceso es captada por el sensor.

El lazo podría adoptar distintas configuraciones con un funcionamiento similar:

- Señal neumática o digital.
- Posicionador electroneumático o dígitoneumático en vez del convertidor I/P.

La calibración de todos los elementos de control no es estrictamente necesaria, ya que el controlador se encarga de llevar la variable al punto de consigna, independientemente de la descalibración de los restantes elementos (transmisor, convertidor o posicionador y la propia válvula de control). Sin embargo, es necesario asegurarse de que todos los elementos del lazo trabajan correctamente a fin de que el proceso tenga el mínimo de desviaciones con relación a su punto de consigna. Este objetivo trae como beneficio la obtención del producto dentro de especificaciones y un ahorro de energía, ya que se reducen los movimientos de la válvula de control y cada movimiento representa una pérdida de aire comprimido, sea abriendo o bien, cerrando la válvula.

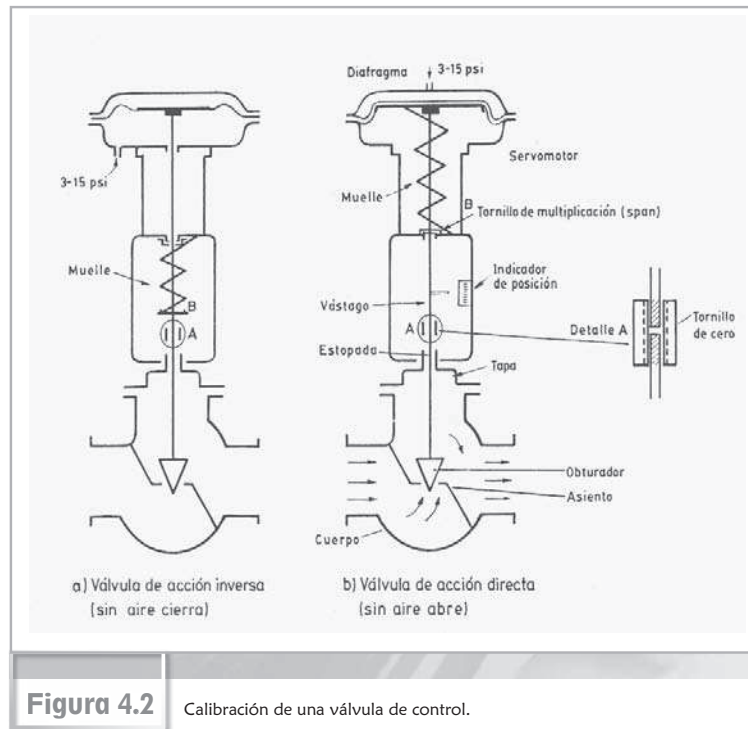
## 4.2 Calibración de la válvula de control

La válvula de control, en forma análoga a los instrumentos, dispone de un tornillo de cero y otro de multiplicación que permiten conseguir que la válvula efectúe su carrera, de la posición cerrada a la totalmente abierta, con aire de 0,2 – 1 bar (20 – 100 kPa) (3 – 15 psi).

Siguiendo el procedimiento general, la calibración se realiza del modo siguiente:

- a. Sin aire sobre la válvula, se acopla un microrruptor con una luz piloto o un palpador de exactitud en un saliente del vástago (o bien, si no se dispone de otros medios, se apoya un dedo sobre el vástago) para detectar el inicio de la carrera del obturador de la válvula.

Se acciona el manorreductor para aumentar poco a poco la señal y a 0,2 bar (20 kPa) (3 psi), la válvula debe iniciar ya su abertura; si ello no ocurre, se acciona el tornillo de cero (posición A de la figura 4.2) que regula la carrera del vástago, lo justo para que la válvula empiece a abrir a 0,2 bar (20 kPa) (3 psi), notándose el punto correcto por el hecho de que cuesta girar el tornillo. En esta posición se fija la plaquita exterior de indicación de carrera de la válvula de modo que marque 0%.

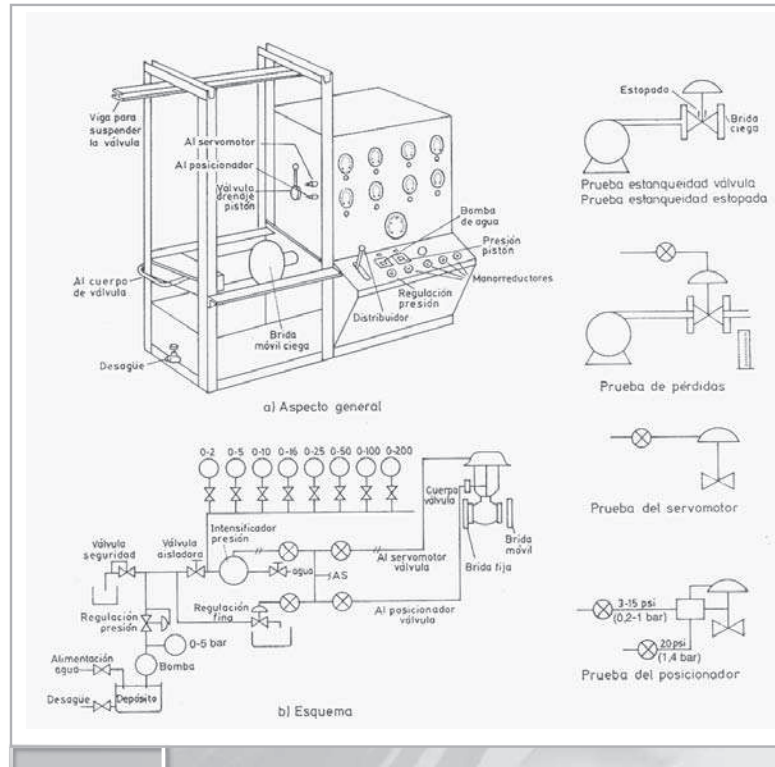
**Figura 4.2**

Calibración de una válvula de control.

- b. Seguidamente, con el manorreductor se da aire a la presión de 1 bar (100 kPa) (15 psi) y el indicador de posición debe marcar 100% de la carrera. Si no ocurre así, se aprieta el tornillo de multiplicación (*span*) B que regula el recorrido del muelle hasta que el índice señale 100%.
- c. Se repiten nuevamente los ajustes de 0% y 100%, el número suficiente de veces para que la válvula quede calibrada correctamente.

Los pasos anteriores se han realizado con una válvula de acción inversa (sin aire cierra). La calibración de una válvula de acción directa (sin aire abre) se efectuaría a la inversa, es decir, a 1 bar (100 kPa) (15 psi) la válvula debería estar cerrada, mientras que a 0,2 bar (20 kPa) (3 psi) estaría completamente abierta; los tornillos a ajustar serían en el primer caso el de multiplicación (B) y en el segundo el de cero (A).

Otras pruebas que pueden realizarse en las válvulas de control mediante un banco de pruebas (figura 4.3) son: prueba hidrostática, prueba de estanqueidad de la estopada, prueba de pérdidas de la válvula con el obturador en posición de cierre, prueba del servomotor y prueba del posicionador.

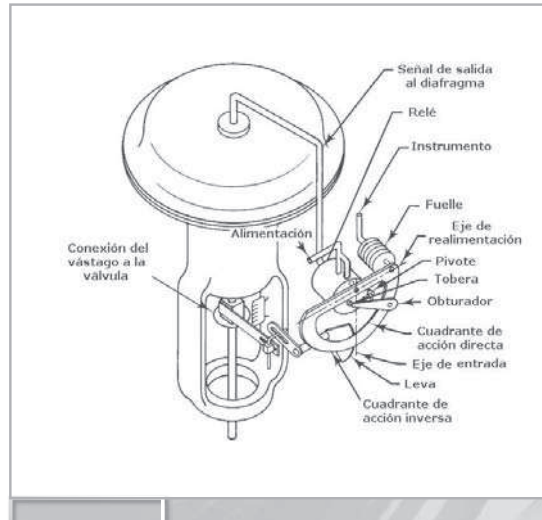
**Figura 4.3**

Banco de prueba de válvulas de control.

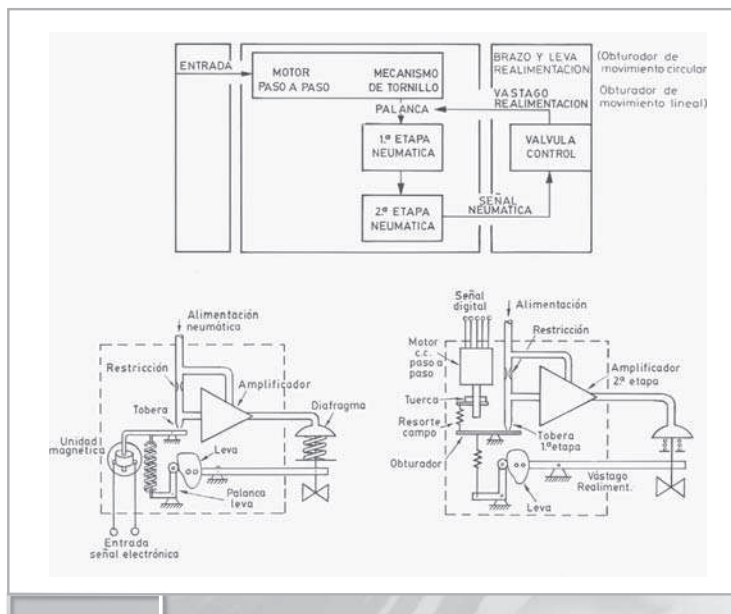
### 4.3 Calibración de posicionadores

Los posicionadores neumáticos y los electroneumáticos se calibran siguiendo el procedimiento general de calibración o de acuerdo con las instrucciones del manual del fabricante.

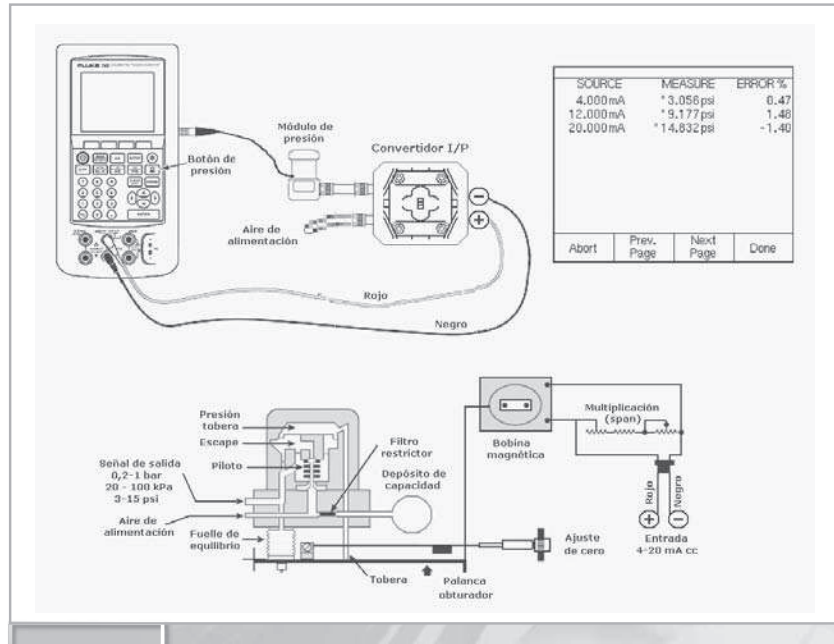
El convertidor I/P de la figura 4.1 puede calibrarse con el montaje de la figura 4.6. Se aplican 3 entradas de 4 mA c.c., 12 mA c.c. y 20 mA c.c. y se anotan los valores correspondientes leídos de la presión. Se ajusta el cero y el *span* (multiplicación) del convertidor y se anotan los resultados. Después de varias pruebas se aceptan los resultados y el aspecto final de la pantalla del calibrador puede verse en la figura 4.6.



**Figura 4.4** Posicionador neumático. Fuente: Fischer Controls International Inc.



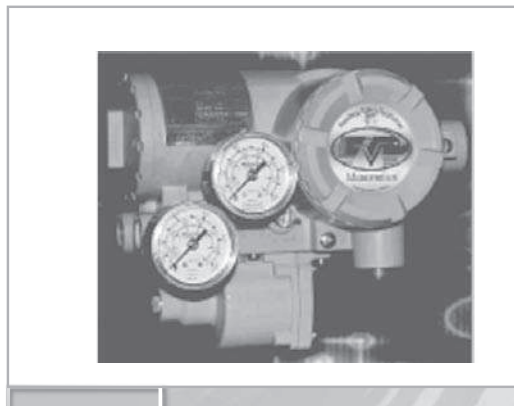
**Figura 4.5** Posicionador electroneumático y digitoneumático.



**Figura 4.6** Calibración del convertidor I/P.  
Fuente: Fluke.

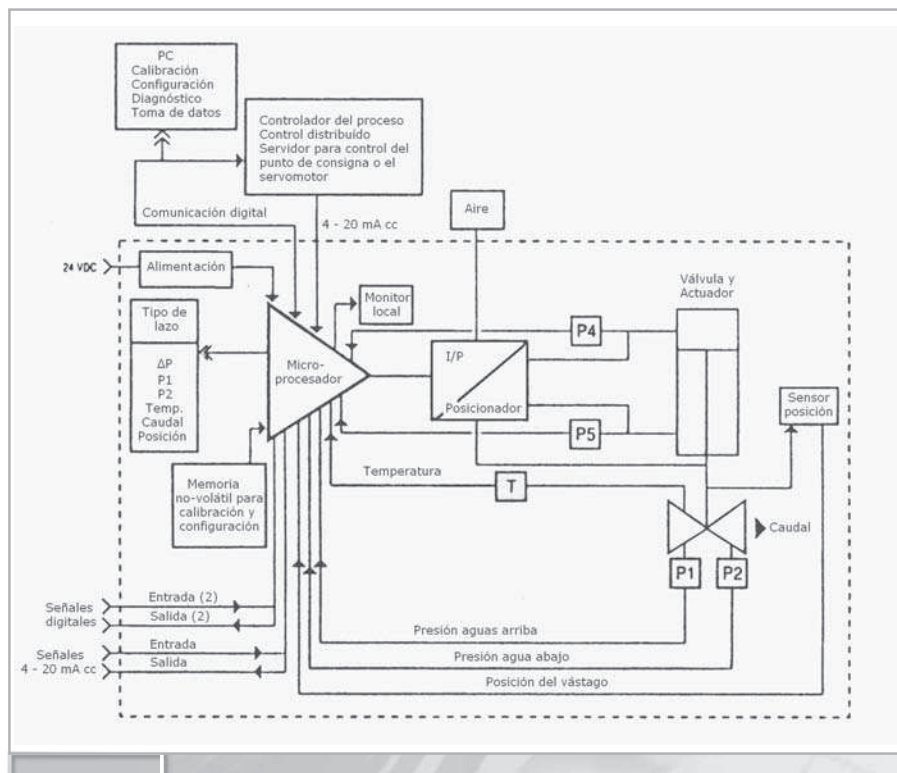
#### 4.4 Posicionador inteligente y diagnóstico de la válvula

El *posicionador inteligente* (fig. 4.7) dispone de una interfase con protocolos de comunicación *HART* o *Fieldbus* (u otro sistema de comunicaciones) y de un microprocesador, lo que le permite realizar diversas funciones de calibración.



**Figura 4.7** Posicionador inteligente.  
Fuente: Masoneilan.

Operación, calibración y configuraciones locales y remotas.  
 Caracterización de la válvula a las curvas lineal, isoporcentual, apertura rápida y personalizada por el usuario.  
 Rozamiento e histéresis de la válvula.  
 Longitud recorrida por el vástago de la válvula (odómetro).  
 Calibración del margen de recorrido y de la velocidad del vástago.  
 Ajuste automático del recorrido de la válvula.  
 Ajuste de la fuerza de asentamiento del obturador de la válvula.  
 Compatibilidad con actuadores de acción directa o inversa.  
 Configuración del cero y el *span* para operación con margen partido.  
 Entradas adicionales (interruptores final de carrera, etc.)  
 Histórico, datos de fábrica y funcionamiento (curvas que son la firma de la válvula).



**Figura 4.8**

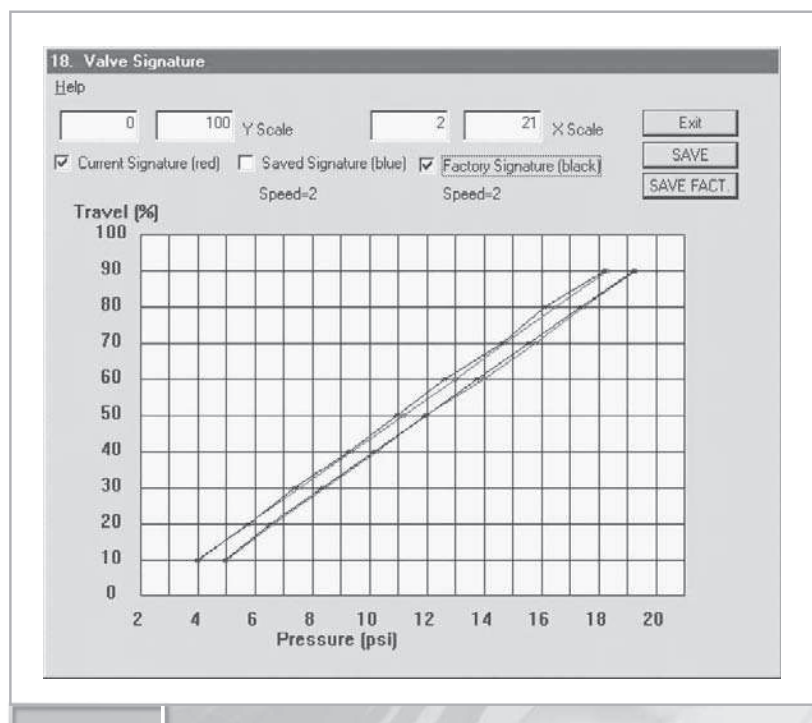
Posicionador electroneumático/digital inteligente.

Como el posicionador conoce por retroalimentación la posición del vástago de la válvula, una función de diagnóstico incorporada permite conocer el estado del mantenimiento de la válvula, del actuador y del propio posicionador.

De este modo, se puede realizar un trabajo de *mantenimiento predictivo* al poder visualizar a distancia datos como el recorrido total del vástago desde la puesta en servicio de la válvula, el rozamiento de la estopada, la velocidad instantánea del vástago, el registro del tiempo de funcionamiento de la válvula, los datos históricos de calibración, la configuración de la válvula y la base de datos iniciales del fabricante.

La “firma” de la válvula (fig. 4.9) es el registro gráfico del estado del conjunto válvula-actuador (medida de la histéresis, zona muerta y linealidad, gráficos o “firmas” del posicionador, del asentamiento, del actuador, de la presión de alimentación con relación al recorrido del vástago).

Puede compararse con “firmas previas” grabadas en la puesta en servicio y en estados posteriores para descubrir cambios en el funcionamiento de la válvula antes de que causen problemas reales en el control del proceso. Puede también realizarse un diagnóstico del proceso y de las comunicaciones y un análisis de fallos. La información puede obtenerse directamente en la válvula, o a través de un ordenador personal o de una consola de operador en la sala de control.



**Figura 4.9**

Gráfico de firma de la válvula.  
Fuente: Masoneilan.

En general, pueden realizarse evaluaciones de la respuesta en escalón en el llenado y vaciado del servomotor, prueba de fugas, tiempo de apertura y ensayo del cero (Tabla 4.1).

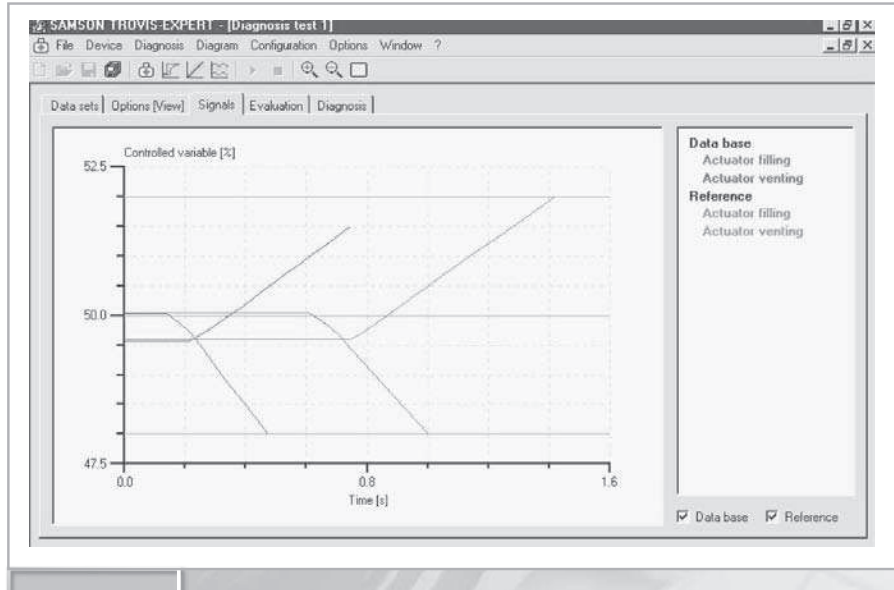
Cambios de parámetro	Diagnóstico respuesta en escalón en llenado del servomotor	Diagnóstico respuesta en escalón en vaciado del servomotor	Fugas	Tiempo de apertura	Punto del cero
Nuevo - Referencia	Vaciado $\Delta tD/\Delta tR$	Llenado $\Delta tD/\Delta tR$			
Sin cambios	0/0	0/0	0		
Bajo rozamiento	-/0	-/0	0		
Alto rozamiento	+/0	+/0	0		
Cambio de la presión de alimentación	0/0	++/++	0		
Baja presión de alimentación (off-line)	0/0	++/++	0	- apertura del resorte	
Alta presión de alimentación (off-line)	0/0	++/++	0	+ apertura del resorte	
Fallo del resorte (off-line)	++/+0	+0/-	0		
Diferencia de presiones (on-line)	++/++	++/++	0		
Contaminación del filtro de aire	-/-	++/++	0		
Fugas en el actuador			+		
El cero está mas bajo					-
El cero está mas alto					+

**Tabla 4.1**

Respuesta en escalón del servomotor, prueba de fugas, tiempo de apertura y ensayo del cero. Fuente: Samson

Uno de los ensayos consiste en medir la respuesta en escalón con la válvula a 50% de su carrera, habiendo aflojado 75% la tensión de la empaquetadura, con lo cual habrá menos rozamiento sobre el vástago de la válvula (figura 4.10). Se observa que el retardo en el llenado o vaciado del servomotor neumático se reduce en 75%.

Por consiguiente, se recomienda al servicio de mantenimiento reajustar la empaquetadura y comprobar si hay fugas. Aunque aparentemente el nuevo ajuste no tiene importancia, sí que la tiene la consideración de que se ahorra la energía adicional gastada durante un año en mover el vástago de la válvula y que habrá que cambiar la empaquetadura con menos frecuencia.

**Figura 4.10**

Respuesta ante un escalón en la válvula a 50% de su carrera.  
Fuente: Samson.

En la tabla 4.2 pueden verse los resultados del diagnóstico ante esta respuesta en escalón, comparada con la de referencia.

Diagnóstico de una válvula de control				
Parámetros de la válvula de control	Diagnóstico actual	Instrucciones actuales	Diagnóstico de referencia	Instrucciones de referencia
<b>Ensayo del diagnóstico</b>	completo		completo	
<b>Tipo de evaluación</b>	ampliado		ampliado	
<b>Actuador</b>				
Área diafragma (cm <sup>2</sup> )	No comprobado		Configuración acc. 350	
Rango	No comprobado		Configuración 0,2 - 1	
Fugas (%)	0 O.K.		0 O.K.	
Presión de alimentación (bar)	1,9 detectada	Comprobar la presión de alimentación	Configuración 6 acc	
Fuerza máxima de cierre (kN)	3,2 reducida		17,5	
Histéresis sin el posicionador	O.K.		O.K.	
Valor mínimo (%)	No determinable		7,2	
Valor medio o actual/cambio (%)	7,2		7,5	
Valor máximo (%)	No comprobado		7,9	
Área de cierre (%)	No comprobado		7,5	
Muelles	No comprobado		O.K.	
<b>Válvula de control</b>				
Punto de cambio del cero (%)	No comprobado		0	
Cierre obturador-asiento	eventualmente reducido		No comprobado	
Presión diferencial máxima permisible	mas baja		40	
Diferencia de presiones (bar)	en línea		0 (off-line)	
Fuerza de rozamiento detectada/máxima prevista	0,32		0,34	
Empaquetadura del vástago (estrés dinámico)	0,03% bajo		Sin comentarios	
Empaquetadura del vástago (compresión)	suficiente		Suficiente	
Intervalo de control superior limitado	no esperado		no esperado	
Intervalo de control inferior limitado	a esperar	Aumentarlo eventualmente	no esperado	
<b>Posicionador</b>				
Filtro de aire	No comprobado		O.K.	
Tiempo de transición mínimo medido			Suficiente	
Tiempo de apertura medido (tiempo de funcionamiento/tiempo de retardo)			1,8/2,4 (X0 = 0%)	
Evaluación del diagnóstico	X Estándar	Ampliada	X Base de datos	X Referencia

Tabla 4.2

Diagnóstico de una válvula de control.  
Fuente: Samson.

## 4.5 Tipos de mantenimiento

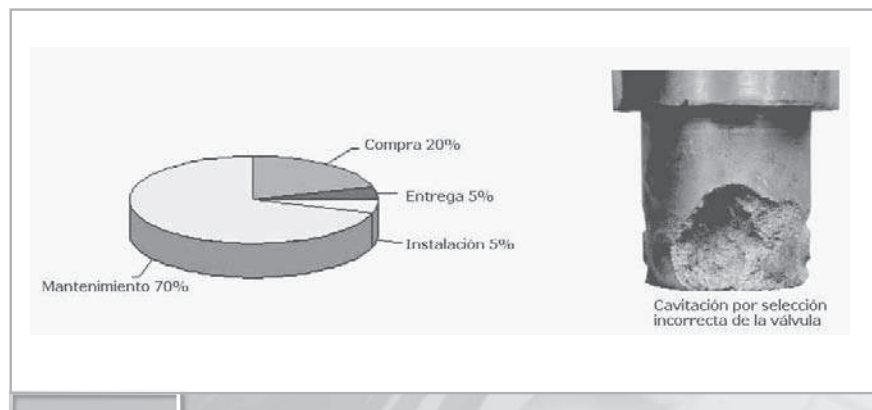
Los tipos de mantenimiento en las válvulas de control se detallan en la tabla 4.3.

Tipos de mantenimiento en válvulas de control		
Tipos	Características	Observaciones
<b>Correctivo</b>	Se espera que ocurra una avería para reparar la válvula o sustituirla.	Las deficiencias sutiles pasan inadvertidas y sin solucionar. Las válvulas críticas pueden fallar y ser desmontadas innecesariamente buscando la causa. Estos trabajos pueden durar un día y los recursos pueden gastarse sin resolver el problema si los síntomas son debidos a otros componentes.
<b>Preventivo</b>	Se dispone de un histórico de las válvulas y se crea un programa de revisiones para prevenir que se presenten averías.	Se cambian las válvulas de acuerdo con un calendario definido y se descubre que algunas válvulas no necesitaban reparación y podían funcionar perfectamente por mucho más tiempo.
<b>Predictivo</b>	Se dispone de aparatos de diagnóstico que indican anticipadamente el riesgo de averías o emplean instrumentos inteligentes que realizan esta misión.	Empieza diagnóstico no intrusivo, posicionadores inteligentes, sistemas de control distribuido y PLC. El personal de mantenimiento debe tener un conocimiento profundo de la estructura y del funcionamiento de la válvula. Fallos en tomar las precauciones adecuadas en el desmontaje de la válvula para su mantenimiento pueden dar lugar a accidentes o a daños en el equipo.

**Tabla 4.3**

Tipos de mantenimiento de las válvulas de control

Las válvulas de control son una parte importante del proceso. El coste del mantenimiento de una válvula a lo largo de su vida útil es del orden de 70%. De aquí que un cuidado adecuado de la válvula puede ahorrar miles de euros a la fábrica, no sólo en equipo sino también en peligros potenciales de seguridad (liberación a la atmósfera de productos tóxicos y peligrosos), vibraciones con daños a tuberías y ruidos que pueden violar las normas ambientales.



**Figura 4.11**

Ciclo de vida y daños por cavitación de la válvula.

Si la válvula no se mantiene, en vez de tener una exactitud de 0,025% en el movimiento del obturador por la señal del servomotor neumático, se va deteriorando, derivando al cabo del tiempo hacia 2% a 5%, lo que disminuye la calidad del proceso y contribuye a una degradación final del producto.

Es importante efectuar una selección correcta de la válvula en tamaño, materiales y actuación. Si no se procede así, pueden presentarse cavitación, vaporización, ruido (*flashing*), degradación de la empaquetadura con fugas del fluido, falta de cierre de la válvula.





# Capítulo 5

## Calibración de controladores

### 5.1 Generalidades

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

- De dos posiciones (todo-nada)*. La válvula adopta las posiciones abierta y cerrada.
- Flotante*. La válvula permanece inmóvil dentro de una zona y remueve en la dirección adecuada cuando sale de la zona.
- Proporcional de tiempo variable*. La relación entre los tiempos de conexión/desconexión de movimiento de la válvula es proporcional al valor de la variable controlada.
- Proporcional*. Existe una relación lineal continua entre la variable controlada y la posición de la válvula de control. Tiene el inconveniente del *offset*, es decir, la desviación estable que puede presentarse entre el punto de consigna y la variable.

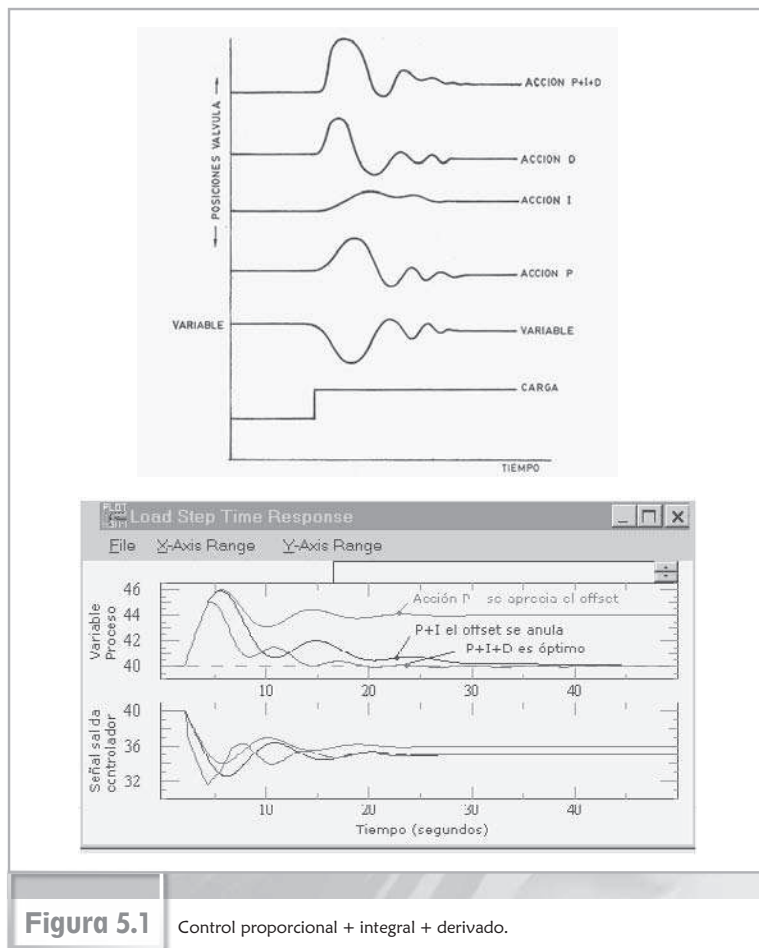
Parámetros que utiliza:

$$\text{Ganancia} = \frac{\text{Variación señal salida del controlador a la válvula de control}}{\text{Valorización señal entrada del transmisor de la variable}}$$

$$\text{Banda proporcional} = \frac{\text{Porcentaje señal entrada transmisor de la variable}}{\text{Valorización señal salida controlada que da una carrera completa de la válvula}}$$

La banda proporcional es la inversa de la ganancia. Así, si la ganancia es 0,5, la banda proporcional es  $100/0,5 = 20\%$ . Señalemos que con la excepción de los instrumentos clásicos, sólo se utiliza la ganancia.

- e. *Proporcional + integral*. Actúa cuando existe una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando dicha desviación en el tiempo y sumándola a la acción de la proporcional. Utiliza el tiempo de acción integral en minutos por repetición (o su inversa, *repeticiones por minuto*) que es el tiempo en que, ante una señal en escalón, la válvula repite el mismo movimiento correspondiente a la acción proporcional. Elimina el *offset* de la acción proporcional.
- f. *Proporcional + derivada*. El control derivativo actúa cuando existen cambios en la variable y su valor es proporcional a la pendiente de la variable. Utiliza el tiempo de acción derivada en minutos de anticipo, que es el intervalo durante el cual la variación de la señal de salida del controlador, debida a la acción proporcional, iguala a la parte de variación de la señal debida a la acción derivada, cuando se aplica al instrumento una señal en rampa.
- e. *Proporcional + integral + derivada*. Es la suma de las tres acciones (figura 5.1).



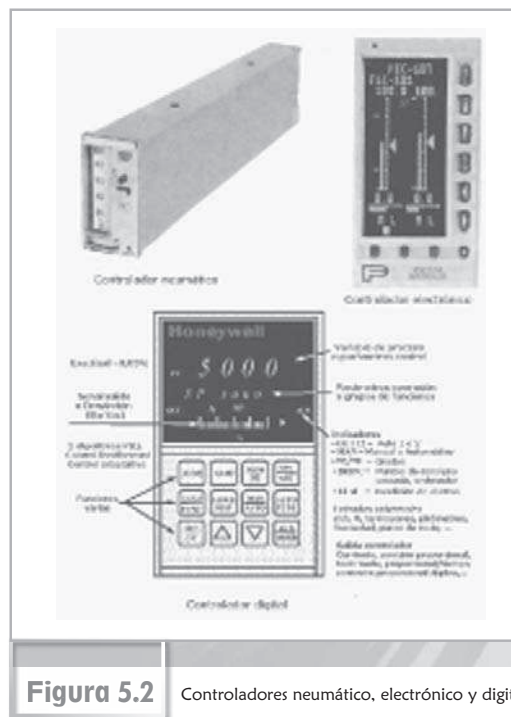
**Figura 5.1**

Control proporcional + integral + derivado.

Sus características resumidas son:

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

En la figura 5.2 pueden verse modelos de controladores neumático, electrónico y digital.



**Figura 5.2** Controladores neumático, electrónico y digital.

## 5.2 Ajuste de controladores

### 5.2.1 Generalidades

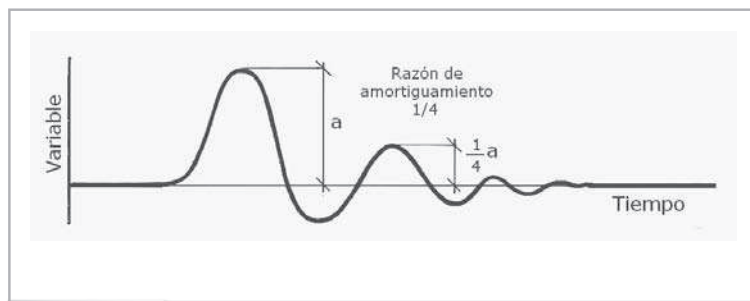
Cuando se pone en marcha una planta tiene lugar normalmente un primer ajuste de los controladores, es decir, la fijación de los valores de las acciones PID. Dado que en la puesta en marcha el tiempo es limitado, los instrumentistas, según su experiencia, prefijan dichos valores y más adelante los ajustan definitivamente. Como guía de aplicación de valores iniciales, figura la siguiente tabla:

<u>Lazo de control</u>	<u>Ganancia</u>	<u>Banda proporcional %</u>	<u>Integral (minutos/repetición)</u>	<u>Derivada (minutos)</u>
<b>Presión (líquidos)</b>	0,2 - 2	500 - 50	0,005 - 0,05	-
<b>Presión (gases)</b>	2 - 100	50 - 1	0,1 - 50	0,02 - 0,1
<b>Caudal</b>	1,25 - 0,4	80 - 250	0,5 - 15	-
<b>Nivel</b>	1 - 2	100 - 50	-	0,01 - 0,05
<b>Temperatura</b>	2 - 5	50 - 20	0,5 - 15	0,5 - 3

**Tabla 5.1** Valores iniciales de las acciones de control.

Existen varios sistemas para ajustar los controladores al proceso, es decir, para que la ganancia (banda proporcional), el tiempo de acción integral (minutos/repetición) y el tiempo de acción derivada (minutos de anticipo) del controlador, caso de que actúen las tres acciones, se acoplen adecuadamente con el resto de los elementos del lazo de control (proceso + transmisor + válvula de control).

Entre estos sistemas el típico es el de razón de amortiguamiento  $1/4$ , en el que después de una perturbación la variable se estabiliza cuando las relaciones entre las amplitudes de las crestas de recuperación sucesivas son de 4 a 1. Este criterio es un compromiso entre la estabilidad de la respuesta del controlador y la rapidez del retorno de la variable a un valor estable: una relación mayor que  $1/4$  dará mayor estabilidad pero prolongará el tiempo de normalización de la variable facilitando la aparición anticipada de perturbaciones, mientras que una relación menor que  $1/4$  devolverá la variable más rápidamente al punto de consigna o a un valor estable, pero perjudicará la estabilidad del sistema.



**Figura 5.3** Criterio de razón de amortiguamiento  $1/4$ .

Para ajustar los controladores, el método práctico es obtener una respuesta real del proceso, lo que puede efectuarse de tres maneras principales.

1. Método de tanteo (lazo cerrado)
2. Método de ganancia límite (lazo cerrado)
3. Método de curva de reacción (lazo abierto)

Aparte de estos tres métodos básicos, existe también software comercial para el ajuste de los controladores que utilizan las fórmulas PID y las últimas reglas de sintonización del controlador al proceso. Entre estos programas figuran:

BESTTune, Control Arts PID Tuning, Control Loop Assistant, Control Station, EnTech Tuner Module, ExperTune, INTUNE, pIDtune, Pitops, Protuner, TOPAS, Tune-Plus, TuneWizard.

### 5.2.2 Método de tanteo (lazo cerrado)

El método de tanteo requiere que el controlador y el proceso estén instalados completamente y trabajando en su forma normal. Se provocan cambios de carga en el proceso, moviendo el punto de consigna arriba y abajo en ambas direcciones, lo suficiente para lograr una perturbación considerable, pero no demasiado grande que pueda dañar el producto, perjudicar la marcha de la planta o crear perturbaciones intolerables en los procesos asociados.

#### Ajuste de los controladores proporcionales.

Se empieza con una ganancia pequeña y se estrecha gradualmente observando el comportamiento del sistema hasta obtener la estabilidad deseada.

#### Ajuste de los controladores con banda P + I.

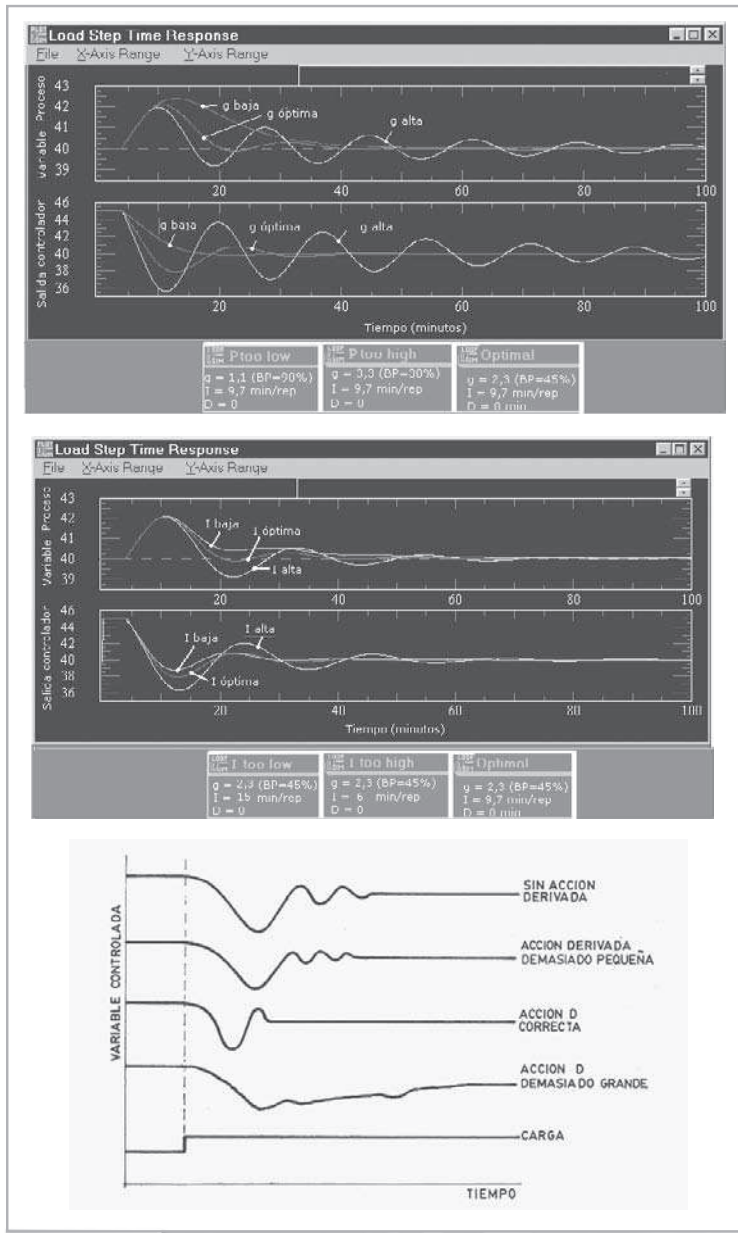
Con la banda integral en  $\infty$  minutos/repeticón, se sigue el procedimiento descrito antes para obtener el ajuste de la ganancia proporcional hasta una relación de amortiguamiento aproximado de 0,25. Como la acción integral empeora el control y al poseerla el instrumento, su ganancia debe ser un poco menor, se disminuye ligeramente la ganancia y a continuación se incrementa por pasos la banda integral, creando al mismo tiempo perturbaciones en forma de desplazamientos del punto de consigna, hasta que empiecen a aumentar los ciclos. La última ganancia ensayada se aumenta ligeramente (se reduce ligeramente la última banda proporcional).

#### Ajuste de los controladores P + I + D.

Con la banda derivada en 0 y la integral en  $\infty$  minutos/repeticón, se aumenta la ganancia proporcional hasta obtener una relación de amortiguamiento de 0,25.

Se aumenta lentamente la banda integral en la forma indicada antes hasta acercarse al punto de inestabilidad.

Se aumenta la banda derivada en pequeños incrementos, creando al mismo tiempo desplazamientos del punto de consigna hasta obtener en el proceso un comportamiento cíclico, reduciendo ligeramente la última banda derivada. Después de estos ajustes puede aumentarse normalmente la ganancia proporcional con mejores resultados en el control.

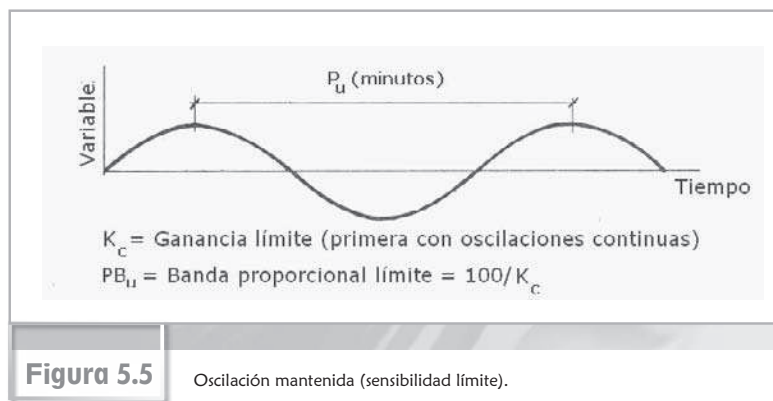


**Figura 5.4**

Ajuste de los controladores P, PI, PID por el método de tanteo.  
Fuente: Expertune.

### 5.2.3 Método de ganancia límite (lazo cerrado)

El método de lazo cerrado fue desarrollado por *Ziegler y Nichols* en 1941 y permite calcular los tres términos de ajuste del controlador a partir de los datos obtenidos en una prueba rápida de características del lazo cerrado de control. El método se basa en aumentar gradualmente la ganancia (o reducir la banda proporcional) con los ajustes de integral y derivada en su valor más bajo, mientras se crean pequeños cambios en el punto de consigna, hasta que el proceso empieza a oscilar de modo continuo (fig. 5.5).



Esta ganancia se denomina ganancia proporcional límite ( $K_c$ ), o bien en el caso de la banda proporcional se llama banda proporcional límite -  $PB_u$  = Proportional Band (Ultimate). Se anota el período del ciclo de las oscilaciones  $P_u$  en minutos.

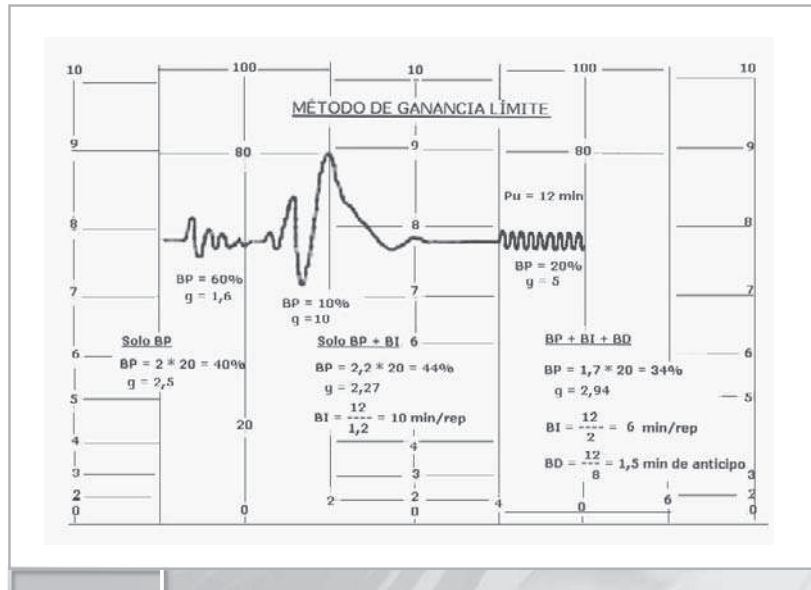
Los ajustes de control que producirán aproximadamente una respuesta con una relación de amplitudes 0,25, se calculan como sigue:

- Controlador proporcional
 

Ganancia = $K_c/2 = 0,5 * K_c$	Banda proporcional (%) = $2 * PB_u$
--------------------------------	-------------------------------------
- Controlador proporcional + integral
 

Ganancia = $K_c/(2,2) = 0,45 * K_c$	Banda proporcional (%) = $2,2 * PB_u$
Banda integral (min/rep) = $P_u/1,2$	
- Controlador proporcional + integral + derivado
 

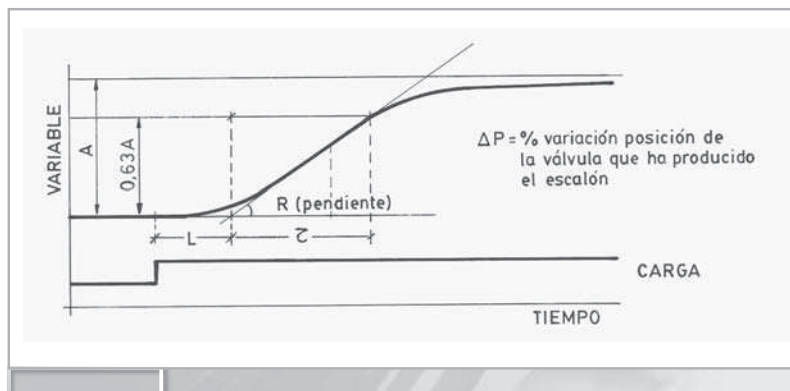
Ganancia = $K_c/(1,7) = 0,59 * K_c$	Banda proporcional (%) = $1,7 PB_u$
Banda integral (min/rep) = $P_u/2$	
Banda derivada (minutos) = $P_u/8$	



**Figura 5.6** Ejemplo del método de ganancia límite.

#### 5.2.4 Método de curva de reacción (lazo abierto)

En este método de lazo abierto, llamado también método de *Ziegler & Nichols* en lazo abierto, el procedimiento general consiste en abrir el lazo cerrado de control antes de la válvula, es decir, operar directamente la válvula con el controlador en manual y crear un pequeño y rápido cambio en escalón en el proceso de entrada.



**Figura 5.7** Método de curva de reacción (Ziegler & Nichols en lazo abierto).

En el punto de inflexión de la curva obtenida se traza una tangente lo más aproximada posible y se miden los valores  $R$  y  $L$  (fig. 5.8).

$R$  es la pendiente de la tangente en el punto de inflexión de la curva.

$L$  es el tiempo de retardo en minutos que transcurre entre el instante del cambio en escalón y el punto en que la tangente anterior cruza el valor inicial de la variable controlada.

$\Delta P$  es el porcentaje de variación de posición de la válvula de control que introduce el escalón en el proceso.

Las ecuaciones a aplicar son las siguientes:

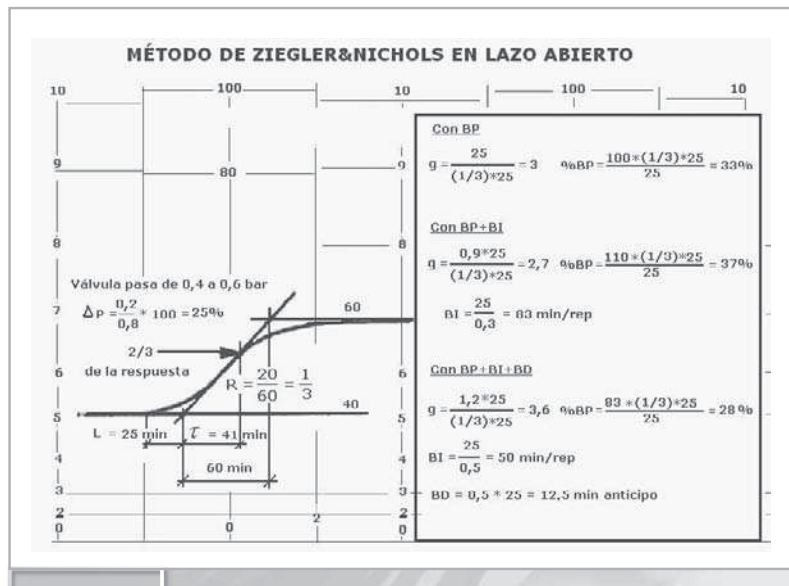
1. Control proporcional:  $g = \frac{\Delta P}{R * L}$        $\%BP = \frac{100 * R * L}{\Delta P}$

2. Control P + I       $g = \frac{0,9 * \Delta P}{R * L}$        $\%BP = \frac{110 * R * L}{\Delta P}$

$$\text{Minutos/Repetición} = \frac{L}{0,3}$$

3. Control P + I + D       $g = \frac{12 * \Delta P}{R * L}$        $\%BP = \frac{83 * R * L}{\Delta P}$

$$\text{Minutos/Repetición} = \frac{L}{0,5} \qquad \text{Minutos de anticipo} = 0,5 * L$$



**Figura 5.8**

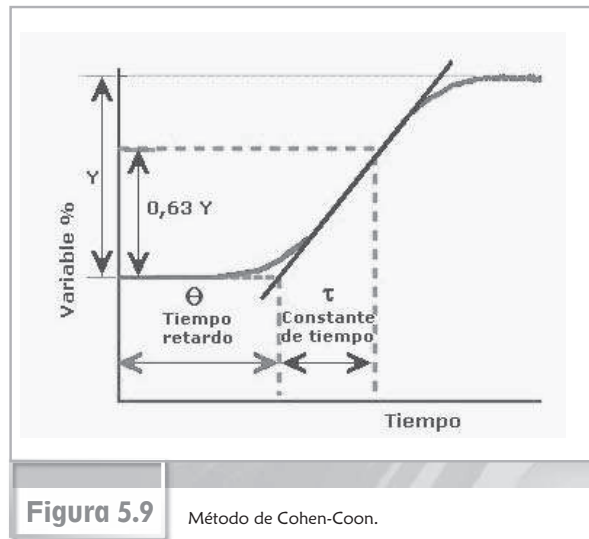
Ejemplo del método de curva de reacción.

### 5.2.5 Método de Cohen-Coon

Su objetivo es obtener una relación de amortiguamiento de 0,25, con un rebasamiento mínimo del punto de consigna y un área mínima de recuperación. Requiere la identificación previa del proceso o como mínimo, valores aproximados de la constante de tiempo  $\tau$  y del retardo del proceso  $\theta$ . Para ello trabaja con el lazo abierto el controlador en manual y crea un cambio en escalón en el proceso de entrada para determinar:

$\tau$  = constante de tiempo

$\theta$  = retardo del proceso



**Figura 5.9** Método de Cohen-Coon.

Las ecuaciones correspondientes son:

- Controlador proporcional 
$$Ganancia = \frac{1}{k_p} * \frac{\tau}{\theta} * \left( 1 + \frac{\theta}{3\tau} \right)$$

- Controlador proporcional + integral

$$Ganancia = \frac{1}{k_p} * \frac{\tau}{\theta} * \left( \frac{9}{10} + \frac{\theta}{12\tau} \right) \quad \text{Banda integral (min/rep)} = \theta * \frac{30 + 3 * \left( \frac{\theta}{\tau} \right)}{9 + 20 * \frac{\theta}{\tau}}$$

- Controlador proporcional + integral + derivado

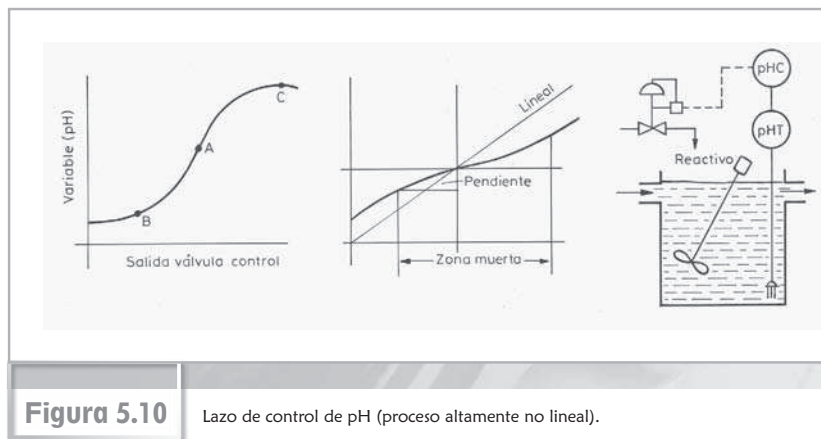
$$Ganancia = \frac{1}{k_p} * \frac{\tau}{\theta} * \left( \frac{4}{3} + \frac{\theta}{4\tau} \right) \quad \text{Banda integral (min/rep)} = \theta * \frac{32 + 6 * \left( \frac{\theta}{\tau} \right)}{13 + 8 * \frac{\theta}{\tau}}$$

$$\text{Banda integral (minutos)} = \theta * \frac{4}{11 + 2 * \frac{\theta}{\tau}}$$

El método no es adecuado en los procesos que no tienen retardo.

### 5.2.6 Procesos no lineales

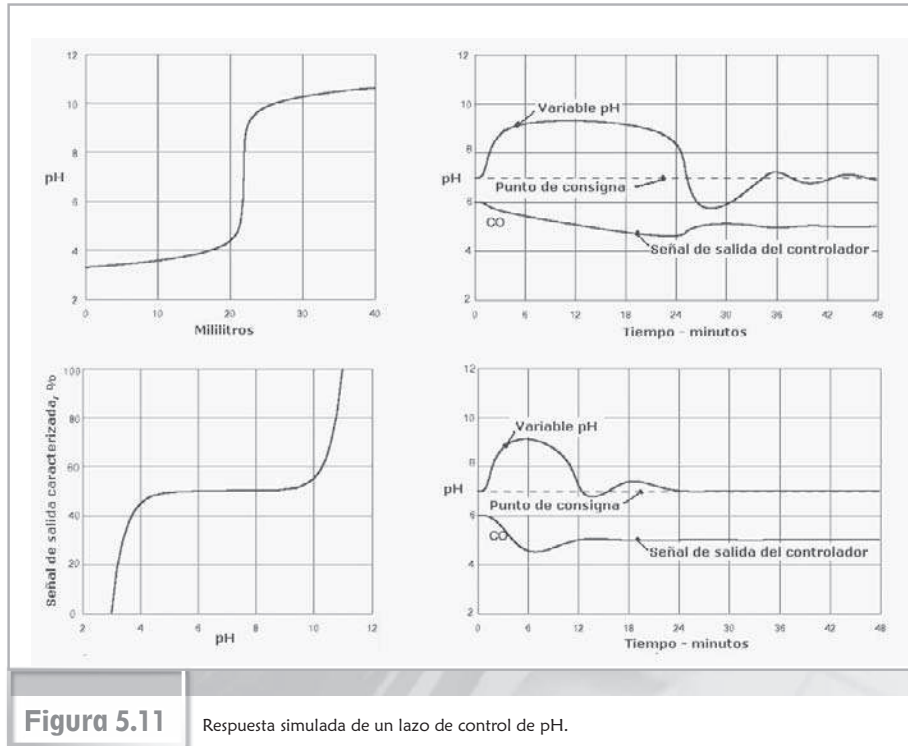
En los procesos que son altamente no lineales, como el de pH (fig. 5.10), la ganancia del controlador debe variar para adaptarse a las diferentes desviaciones de la variable con relación al punto de consigna.



Se utiliza el llamado control planificado, que adapta los parámetros del controlador en función del punto de operación. Uno de los modelos es el de ganancia inversa, que utiliza un controlador con características opuestas a las del proceso, en el que puedan seleccionarse la anchura de la zona muerta y la pendiente de tal modo que la ganancia equivalente es:

$$\text{Banda integral (minutos)} = \frac{1}{(\text{ganancia dial}) \cdot (\text{pendiente})}$$

En la figura 5.11 puede verse la respuesta simulada de un lazo de control de pH sin control planificado, es decir, sin compensación no lineal, ante una disminución de la carga de ácido en el tanque de neutralización.



El punto de consigna es 7, el tiempo de residencia es 20 minutos y se observa que la recuperación del pH por parte del controlador PI es muy lenta, provocando un consumo exagerado del reactivo. La ganancia es de sólo 0,16, ya que un mayor valor volvería inestable el proceso.

Aplicando un caracterizador del proceso (inverso de la variación del pH), la recuperación ante la misma disminución de carga de ácido es más rápida, el amortiguamiento más uniforme y la forma de la señal de salida corresponde ahora a un lazo de control de características lineales. El control planificado ha permitido mejorar el comportamiento del lazo de control, aumentando la ganancia del controlador a un valor de 7.

### 5.3 Calibración de instrumentos digitales

Aunque los procedimientos dependen del fabricante, y es recomendable leer y aplicar las instrucciones del manual, la marcha general es la siguiente:

#### Controlador universal

Se llama el programa SET UP, donde se dispone de los valores de las entradas de alta y baja calibración. Se entra en el modo de calibración, se aplica la señal de referencia y se pulsa la tecla CAL (calibración). El microprocesador del controlador

establece automáticamente el campo de medida, eliminando de este modo los ajustes mecánicos. Se anotan los valores de las constantes de calibración, con lo que una nueva recalibración a los mismos valores del campo de medida que puede efectuarse más adelante será muy sencilla, bastando ingresar los valores conocidos de las constantes de calibración.

#### Resto de instrumentos de la planta

El software analiza los datos e interpreta los síntomas y fallos, generando una acción recomendada de mantenimiento. De este modo, al técnico de mantenimiento le basta pulsar unas pocas teclas para comprobar a distancia un instrumento, configurarlo y calibrarlo. Y el *staff* de mantenimiento puede vigilar el estado de los instrumentos a través del monitor, con lo que sabe inmediatamente si existe un problema, lo que evidentemente ahorra paros inesperados de la planta.

Se crea además una base de datos de todos los instrumentos comunicados con el sistema y la gestión de su mantenimiento.

En el mercado se encuentran programas de gestión de mantenimiento, entre los que figuran AMS, de Fisher Rosemount, ASSET MAX, de Honeywell, PDM, de Siemens, SMARTVISION, de ABB, PC20, de Foxboro, etc.



# Tipos de mantenimiento

## 6.1 Generalidades

Los instrumentos requieren un mantenimiento para su apropiado funcionamiento. Este mantenimiento representa 40% de los costes de fabricación del producto. Los tipos de mantenimiento son correctivo, preventivo y predictivo.

### 6.1.1 Mantenimiento correctivo

Los instrumentos se reparan cuando fallan por completo o cuando están ya en su etapa final de desgaste, cuando su coste de servicio es extremadamente alto. En el caso de instrumentos en lazos críticos, el fallo puede ocasionar un paro parcial o total de la planta. El 50% del mantenimiento es correctivo, es decir, el personal de mantenimiento dedica la mitad de su tiempo a reparar los instrumentos implicados posiblemente en el peor momento y con prisas y sin disponer de los aparatos y las piezas de recambio correspondientes. Si no están en stock debe pedirlos al precio que sea al proveedor que se lo entregue más pronto. Como resultado, el mantenimiento correctivo es 10 veces más caro que el mantenimiento preventivo. Por estos motivos, el mantenimiento correctivo tiene sus días contados a favor del preventivo y en particular, del predictivo.

Dentro del coste de mantenimiento del lazo de control, el mantenimiento correctivo representa 60%, mientras que el objetivo de las compañías debería ser 10% (figura 6.1).

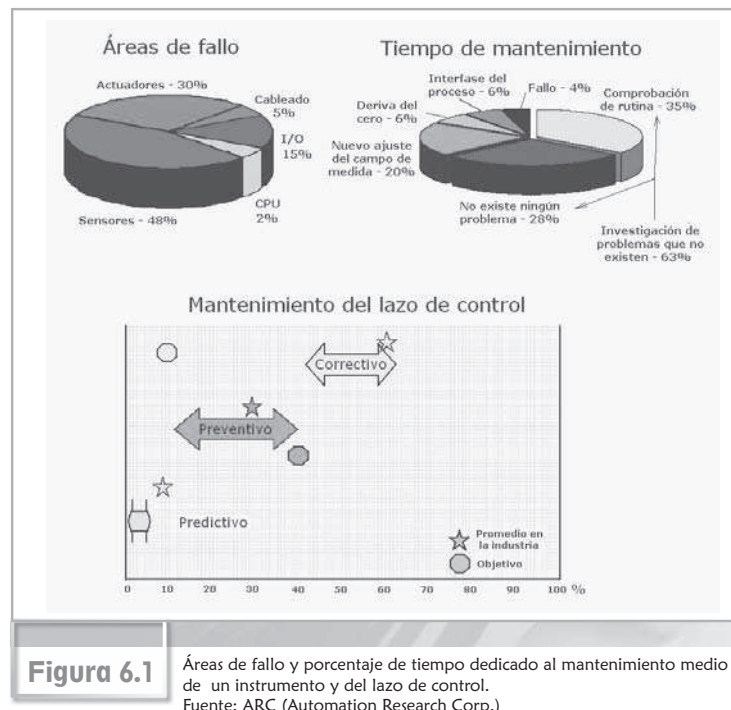
### 6.1.2 Mantenimiento preventivo

Los instrumentos se revisan a intervalos regulares de acuerdo con su historial de averías en la planta y las recomendaciones del fabricante. Las revisiones se planifican por anticipado presumiblemente en las fechas de paro de la planta y estando el servicio preparado con los aparatos, piezas de recambio y recursos humanos necesarios. Una desventaja de este método es que en muchas ocasiones se revisa un instrumento sin

necesidad, con lo cual puede posiblemente alterarse su funcionamiento, lo que podría conducir a un fallo prematuro del mismo. Realmente, 60% de los trabajos preventivos es innecesario.

Actualmente el mantenimiento preventivo representa 30% del coste, cuando el objetivo debería ser 40%, y es unas cinco veces más caro que el mantenimiento predictivo.

En la figura 6.1 se representan las áreas de fallo y los tiempos dedicados al mantenimiento de instrumentos. Se observa que durante 63% del tiempo se investigan problemas que no existen. Las comunicaciones HART y fieldbus mejoran este porcentaje, de tal modo que permiten realizar 80% del tiempo de mantenimiento, desde la estación de trabajo. Los fallos de los instrumentos (4%) y de la interfase del proceso (6%) requieren todavía la presencia en campo de un mecánico instrumentista.



### 6.1.3 Mantenimiento predictivo

Los instrumentos se revisan de acuerdo con el dictamen realizado mediante aparatos que avisan del posible fallo del instrumento en un tiempo determinado. Si bien el mantenimiento predictivo está muy extendido en máquinas rotativas, se encuentra en su fase de desarrollo creciente en los instrumentos, representando actualmente 10% de los trabajos totales de mantenimiento.

Para reducir este tiempo, los transmisores inteligentes, los controladores digitales y el control distribuido e integrado, aportan autodiagnóstico que avisa al departamento de mantenimiento acerca de los fallos y de su localización, facilitando la reparación por sustitución de la tarjeta electrónica donde esté el componente averiado.

En la tabla 6.1 puede verse un estudio económico simple de una empresa que dedica anualmente un millón de euros a mantenimiento, de los cuales 100.000 euros/año se dedican al mantenimiento de los instrumentos de medición y control. Se observa que hay un ahorro por año de 47.200 euros, lo que representa:

$$\frac{47.200}{1.000.000} * 100 = 4,72\% / \text{año}$$

Gastos de mantenimiento 1.000.000 euros/año (100.000 euros/año a mantenimiento de instrumentos)					
Mto correctivo	Actual = 50%	Mto preventivo	Actual = 30%	Mto predictivo	Actual = 5%
	Objetivo = 10%		Objetivo = 40%		Objetivo = 10%
Dato: Pasar de correctivo a preventivo reduce los costes en un factor de 10					
Dato: Pasar de preventivo a predictivo reduce los costes en un factor de 5.					
Gastos mantenimiento total/año	Mto instrumentos 100.000 euros/año	Mto correctivo actual (50%)	Mto correctivo objetivo (10%)	Ahorro potencial si se cumple el objetivo	Inicialmente la fábrica no utiliza el mto predictivo, de modo que el 50% restante se dedica a mto preventivo
1.000.000	100.000	0,5	0,1	0,4	0,5
		50000	10000	40000	50000
Objetivo de la gerencia = Implantar los objetivos de los 3 tipos de mantenimiento					
Objetivo mto preventivo = 40% de 100.000 euros = 40.000 euros. Si lo cumple ahorra 10.000 euros.					
Así, la fábrica alcanza el 10% mto correctivo (10.000 euros) y el 40% mto preventivo (40.000 euros)					
De los 40.000 euros del mto correctivo ahorrados, se gastarán 4.000 si se dedican a mto preventivo					
De los 50.000 euros de gasto de mto preventivo se gastarán solo 10.000 si se pasa a mto predictivo					
Combinando, se gastan en mto preventivo + mto predictivo 4.000+ 10.000 = 14.000 euros/año,					
Estos 14.000 euros/año, convertidos íntegramente a mto predictivo pasan a 14.000/5 = 2.800 euros					
El ahorro total es 50.000 - 2.800 = 47.200 euros/ millón de euros del gasto total mto					

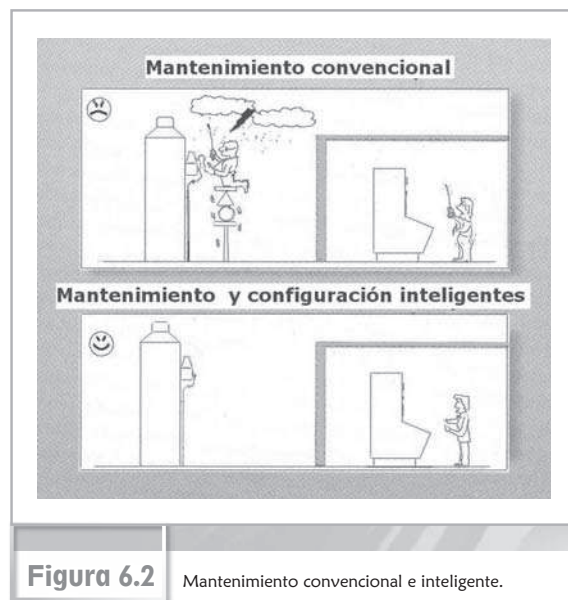
**Tabla 6.1**

Estudio económico simple de una empresa que implante los objetivos de los mantenimientos correctivo, preventivo y correctivo  
Fuente: ARC (Automation Research Corp.)

El paso al mantenimiento predictivo tiene como beneficios adicionales que el servicio de mantenimiento sólo va a trabajar con los instrumentos que realmente necesiten el servicio y que este menor mantenimiento va a repercutir favorablemente en la menor exposición al riesgo de la planta por parte de los instrumentistas y, por consiguiente, en una mayor seguridad.

Por otra parte, la implantación del control predictivo va a precisar de una formación especial del personal sobre el software de mantenimiento, los instrumentos inteligentes, el control distribuído y las comunicaciones. De acuerdo con esta formación y con la colaboración de los proveedores de los instrumentos, deberán cambiar las prácticas de mantenimiento, por lo que los ahorros y beneficios sólo empezarán a ser aparentes al cabo de 1 a 2 años.

En la figura 6.2 puede verse una comparación entre el mantenimiento con instrumentos convencionales neumáticos y electrónicos y el que se realiza con instrumentos inteligentes. La elección es clara.



**Figura 6.2**

Mantenimiento convencional e inteligente.

## 6.2 Seguridad y fiabilidad de los instrumentos

### 6.2.1 Generalidades

La seguridad de funcionamiento de los elementos de medida y transmisión depende de la correcta aplicación y de la instalación adecuada de los aparatos. Por ejemplo, un medidor de turbina que mida caudales de líquidos con partículas en suspensión, y que esté instalado sin filtro, tendrá seguramente una vida útil corta, aparte de indicar caudales erróneos todo el tiempo que continúe funcionando con las palas de la turbina desgastadas. Y un medidor de caudal de presión diferencial que utilice una placa orificio en fluidos con sólidos abrasivos en suspensión dará lugar a una degradación gradual de la medida, ya que el orificio de la placa irá desgastándose con el tiempo y perderá sus dimensiones y su forma.

Tiempo medio entre fallos de los instrumentos (MTBF)						
Variable	Instrumento	MTBF - Tiempo medio entre fallos (años)	Variable	Instrumento	MTBF - Tiempo medio entre fallos (años)	
Presión	Transmisor de presión	0,1 - 5	Válvulas de control	Válvula todo-nada	7	
	Manómetro	10		Válvula de control	1 - 5	
	Presostato	3		Válvula de solenoide	2,5 - 5	
Caudal	Placa-orificio, Tobera, Tubo Venturi	0,2 - 5		Válvula de alivio	45	
	Turbina	12,5 - 20		Posicionador	2,3	
	Desplazamiento positivo	1 - 10		Convertidor I/P	2	
	Magnético	0,5 - 2		Convertidor electroneumático	14 - 50	
	Presión diferencial	0,6 - 1,5		Controlador	2,5 - 5	
	Rotámetro	3,3 - 1		Registrador electrónico	1,4	
Nivel	Burbujeo	39114		Instrumentos de panel	Registrador de gráfico de banda	4,5
	Presión diferencial neumático	0,5 - 0,6	Alarmas		2,5	
	Presión diferencial electrónico	0,5 - 33	Lazos de control		Presión	0,8 - 0,9
	Flotador	0,5 - 5		Caudal	0,5 - 0,6	
	Vidrio	0,2 - 10		Nivel	0,4 - 0,5	
	Temperatura	Capacitancia	4,5	Analizadores	Temperatura	0,5 - 1
Burbujeo		1 - 2	CO <sub>2</sub>		0,1 - 1	
Termopar		2 - 10	Conductividad		0,2 - 2	
Sonda de resistencia		2,5	Punto de rocío		1,25	
Termómetro de mercurio		33	Oxígeno		0,2 - 2	
Termómetro de bulbo de presión de vapor		2,5	Hidrógeno		1,25	
Otras variables		Pirómetro de radiación	0,5	Instrumentos inteligentes	pH	0,2 - 2
		Pirómetro óptico	0,1		Transmisor de presión inteligente - sensor	385
		Transmisor temperatura	0,5 - 2		Transmisor de presión inteligente - módulo electrónico	3,27
Otras variables		Controlador local	0,5 - 2	Componentes electrónicos	Transmisor de temperatura inteligente - sensor	22,94
	Densidad radiación por	1 - 3	Transmisor de temperatura inteligente - módulo electrónico		3,27	
	pH y ORP	0,1 - 0,4	Transductor de señal de entrada		12	
	Conductividad	0,1 - 0,4	Hardware procesador		1,2	
	Célula de carga	0,3	Software procesador		0,25	
	Transmisor	0,7		Transductor de señal de salida	12	

Tabla 6.2

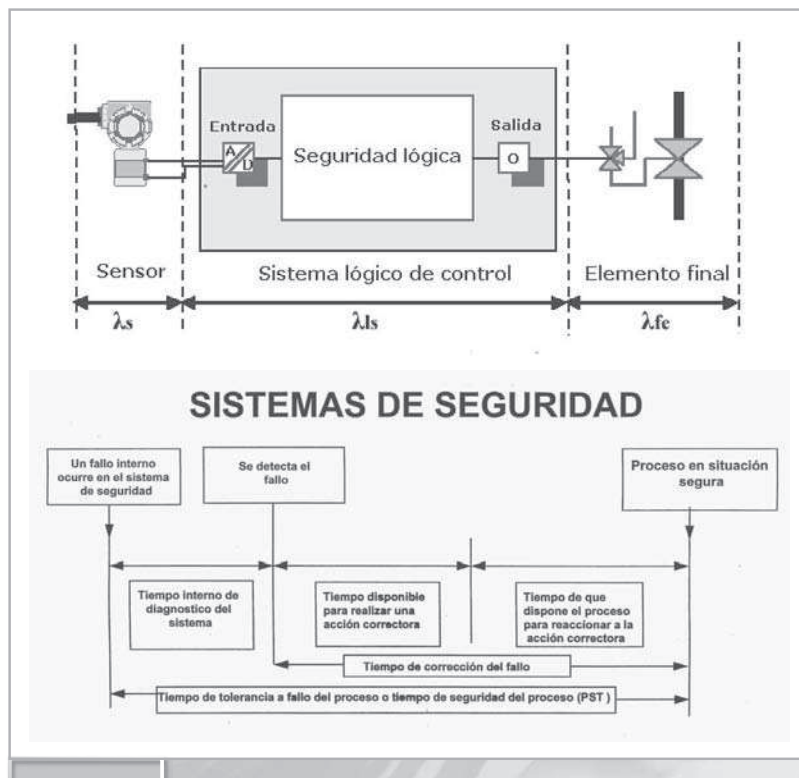
Tiempo medio entre fallos de los instrumentos

Aunque la fiabilidad de los instrumentos depende mucho de la aplicación local en cada planta, por las diferentes condiciones de servicio y ambientales a que están sometidos, es útil tener una idea aproximada del llamado *tiempo medio entre fallos* de los aparatos.

La tabla 6.2 ilustra el *tiempo medio entre fallos* de los instrumentos. Hay que señalar que los instrumentos inteligentes que disponen de autodiagnóstico han alargado considerablemente el tiempo medio entre fallos, de tal modo que ya se puede afirmar que se instalan y uno se olvida de ellos. Esto no es totalmente cierto porque detrás está el servicio de mantenimiento que periódicamente piden datos de su estado al sistema, o el sistema los da automáticamente.

### 6.2.2 Nivel integral de seguridad (SIL)

El concepto de seguridad de los instrumentos engloba la llamada seguridad funcional durante el ciclo de vida del instrumento, es decir, especifica el *Nivel de Integridad de la Seguridad* (SIL – Safety Integrity Level) que define, en función del posible impacto de un fallo sobre personas y bienes y su probabilidad, el nivel de seguridad requerido del sistema y, por tanto, de todos sus componentes.



**Figura 6.3**

Acciones a tomar para mantener el nivel de seguridad.

Los sistemas de seguridad tienden a que el *tiempo de tolerancia a fallo del proceso* o *tiempo de seguridad del proceso* PST (Process Safety Time) no sea superado, cuando ocurre un fallo en el proceso o en el sistema de seguridad, porque en caso contrario el proceso pasaría a una situación no segura.

Desde el punto de vista de seguridad del proceso, las normas de interés especial son:

- IEC 61508. Define los requisitos que deben cumplir los sistemas de control para la reducción del riesgo de los sistemas y del equipo empleado, mediante el SIL (Safety Integrity Level, nivel de integridad de seguridad).
- ANSI/ISA 84.01-1996. Define los requisitos para los Sistemas de Seguridad (SIL) y detecta las situaciones de peligro potencial de un proceso y actúa para llevar el proceso al estado seguro.

La relación entre el Nivel de Integridad de la Seguridad (SIL) y la probabilidad de fallo a la demanda (PFD) puede verse en la tabla 6.3.

SIL	IEC 61508	ISA S84.01	PFD – Baja demanda (Probabilidad de fallo)	PFD – Alta demanda (Probabilidad de fallo)	Disponibilidad	1/PFD	Impacto sobre personal
					(1-PFD)	Tiempo medio entre fallos	
4	Sí	No	$\geq 10^{-5}$ a $< 10^{-4}$	$\geq 10^{-9}$ a $< 10^{-8}$	>99,9%	100.000 a 10.000	Impacto catastrófico
3	Sí	Sí	$\geq 10^{-4}$ a $< 10^{-3}$	$\geq 10^{-8}$ a $< 10^{-7}$	99,90 – 99,99%	10.000 a 1.000	Protección a personal
2	Sí	Sí	$\geq 10^{-3}$ a $< 10^{-2}$	$\geq 10^{-7}$ a $< 10^{-6}$	99,00 – 99,90%	1.000 a 100	Protección importante
1	Sí	Sí	$\geq 10^{-2}$ a $< 10^{-1}$	$\geq 10^{-6}$ a $< 10^{-5}$	90,00 – 99,00%	100 a 10	Protección pequeña

**Tabla 6.3**

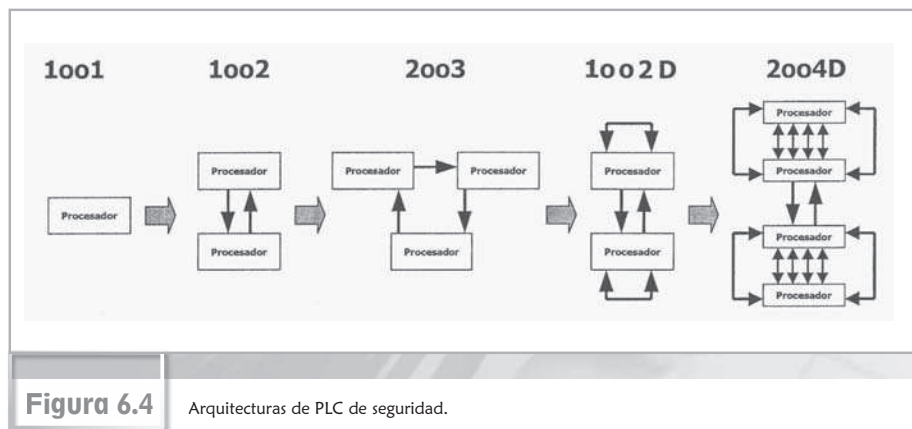
Correlación entre SIL y PFD

### 6.2.3 Circuitos digitales de tolerancia de fallos

Los circuitos digitales de los instrumentos que excluyen o toleran el fallo se conocen como:

- 1oo1 (uno de uno - *one out of one*) que utiliza un sistema de canal simple. Un fallo se traduce en la pérdida de la función de seguridad y en la parada forzosa del proceso. Si dispone de diagnóstico automático de fallos se designa 1oo1D.
- 1oo2 (uno de dos - *one out of two*). Si un canal falla, el otro realiza la función de seguridad. Sin embargo, la probabilidad de fallo falso se duplica.

- 2oo2 (dos de dos - *two out of two*). Se reduce la probabilidad del fallo falso pero se duplica la probabilidad de fallo a la demanda.
- 2oo3 (TMR - *Triple Modular Redundant - two out of three*). Existen tres canales de los que dos funcionan bien para realizar las funciones de seguridad, por lo que son tolerantes a un fallo.
- 1oo2D (*one out of two + diagnóstico automático de fallos*). 1oo2 es excelente con respecto a la seguridad pero no es tolerante a fallos respecto a la disponibilidad. En la 1oo2D un fallo único detectado no conlleva la pérdida de la seguridad o la parada del proceso, puesto que, aislado el canal afectado, el canal sano continuará la operación.



**Figura 6.4** Arquitecturas de PLC de seguridad.

- 2oo4D (QMR, *quadruple modular redundant*)(*two out of four + diagnóstico automático de fallos*). Es tolerante a dos fallos para la integridad de la seguridad y a un fallo respecto a la disponibilidad del sistema.

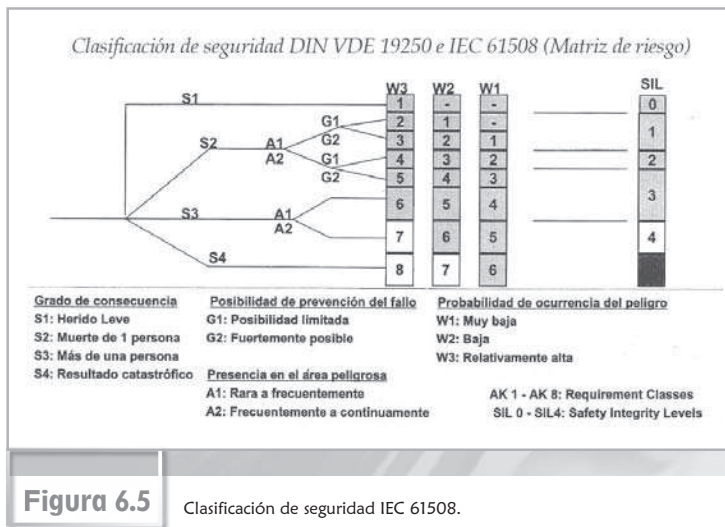
Los instrumentos certificados SIL presentan una nueva área.

SIL 1 = Área normal (tolerable). Daños poco importantes.

SIL 2 = Área de control crítico (tolerable). Daños importantes en la propiedad y lesiones a personas. Típico en la industria química y petroquímica. Un transmisor de presión certificado proporciona el mismo nivel de protección que dos transmisores convencionales conectados en paralelo.

SIL 3 = Área de control muy crítico (indeseable). Daños importantes en la propiedad y muerte de una persona y lesiones a la comunidad. Típico en la industria química y petroquímica. Dos transmisores de presión certificados proporcionan el mismo nivel de protección que tres transmisores convencionales.

SIL 4 = Área de control catastrófico (intolerable). Daños muy importantes en la propiedad y muerte de personas.



**Figura 6.5**

Clasificación de seguridad IEC 61508.

Como ejemplo del desarrollo continuo de los instrumentos por parte de los fabricantes, para satisfacer estas necesidades de la industria, el primer transmisor de presión con certificación Tüv que cumple con IEC 61508 en los niveles SIL2 y SIL3 dispone de autodiagnóstico de seguridad, validación de la señal del sensor y del circuito electrónico y un alto nivel de redundancia en el hardware y el software (ABB Automation, 2007). El instrumento utiliza dos señales inductivas detectadas independientemente y analizadas internamente. Un microcontrolador compara estas dos señales para validar la señal de salida y en el caso de que exista una diferencia entre las mismas, conduce la señal de salida analógica a una condición segura.

La exactitud de este transmisor es  $\pm 0,075\%$ , un tiempo medio entre fallos (MTBF) de más de 100 años. Todos los datos de caracterización del transmisor se almacenan en el sensor primario, de tal modo que el módulo electrónico puede actualizarse en campo sin necesidad de efectuar una recalibración del instrumento.

### 6.3 Frecuencia de mantenimiento de los instrumentos

Frecuencia de mantenimiento de los instrumentos						
Instrumento	Frecuencia de la revisión					Notas
	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual	Bianual	
<b>Elementos primarios</b>						
Termómetro bimetálico			X			
Placa-orificio				X		
Tubo Pitot			X			
Rotámetro				X		
Termopares			X			
<b>Instrumentos neumáticos y electrónicos clásicos</b>						
Transmisores de presión, presión diferencial, nivel de radiación y temperatura de bulbo	X					Mensual: ajuste de cero y span si es necesario y si el servicio es duro. Semestral: Comprobación de la calibración en servicio normal. Anual: limpieza de todos los componentes, montaje y calibración del instrumento.
Registrador e indicador neumático y electrónico		X				Trimestral: comprobación del gráfico y pluma. Anual: revisión fuelles y calibración
Potenciométrico y puente de Wheatstone y Registrador multipunto	X		X			Mensual: Comprobación con el potenciómetro. Semestral: limpieza y engrase. Anual: revisión general
Controlador	X			X		Mensual: Comprobación indicación y manual-automática. Anual: Revisión general y calibración
Válvula de control neumática				X		Semestral: comprobación de pérdidas, limpieza y engrase si es necesario. Anual: desmontaje y examen interno, comprobación del posicionador y recalibración
<b>Instrumentos digitales</b>						
Medidores de caudal de gas			X			
Turbina				X		
Medidor de caudal magnético				X		
Desplazamiento positivo						
Medidor de nivel de ultrasonidos				X		
Indicador de temperatura				X		
Medidor de densidad de radiación				X		
Baásculas				X		
Cromatógrafo				X		
Analizador de infrarojos				X		
Válvula de control digital				X		

**Tabla 6.4**

Estimación de la frecuencia de mantenimiento de los instrumentos.

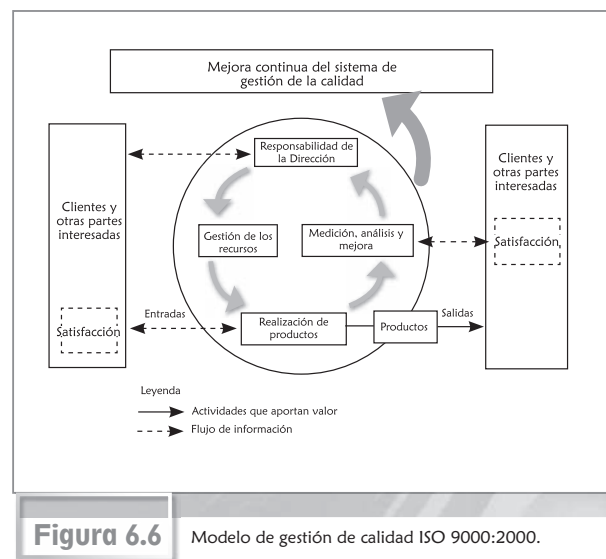
## 6.4 Normativa de calidad ISO 9000:2000 aplicada a la instrumentación

El Organismo ISO (International Standards Organization, Organización Internacional de Normas) tiene la finalidad de crear una normativa común basada en las normas utilizadas en muchos países y que cubren una gran variedad de temas. La norma ISO 9000 de 1994 fue actualizada en el año 2000 bajo el nombre de ISO 9000:2000. En esta norma se exigen procesos adecuados (con o sin procedimiento documental), siendo uno de sus objetivos principales el aumento de la satisfacción del cliente. Entre los estándares figuran:

- ISO 9000 - Fundamentos de la gestión de la calidad y terminología.
- ISO 9001 - Requisitos del proyecto, fabricación, instalación y servicios de productos
- ISO 9004 - Sistemas de dirección y organización de la calidad.
- ISO 19011 – Auditorías de gestión de calidad y gestión ambiental.

Los requisitos del cliente son productos con características que satisfacen las necesidades y expectativas del cliente y que se expresan en la especificación del producto. La realización del producto y las mediciones para garantizar su calidad corresponden a la empresa, atendiendo a las variables críticas del proceso de fabricación.

Este comportamiento de la empresa conduce a una satisfacción del cliente y ello repercute en un análisis y mejora del proceso de producción en la forma vista en la figura 6.6 del modelo de gestión de calidad.



Desde el punto de vista de calibración de los instrumentos, la norma más importante es la ISO 9001, de la que se cita aquí una información adicional resumida:

• ISO 9001

Los requisitos que se establecen en esta norma tienen como objetivo fundamental evitar productos no conformes en todas las etapas, desde el proyecto del producto hasta el final de su vida útil o, si estos se producen, detectarlos antes de su instalación y tomar las medidas correctivas oportunas. Estas medidas pueden contener una inspección final y los ensayos correspondientes.

Con relación al apartado de “Equipos de inspección, medida y ensayo”, el sistema de calidad ISO 9001 establece que el suministrador de un producto debe aportar una confirmación metrológica (conjunto de operaciones necesarias para asegurar que el equipo de medición cumple con los requisitos para su uso previsto). Es decir:

- Identificar, calibrar y ajustar todo el equipo de inspección, medida y ensayo que puede afectar la calidad del producto, a intervalos definidos con relación a equipos de calibración certificados por un organismo reconocido.
- Establecer, documentar y mantener los procedimientos de calibración de los instrumentos y de los equipos de calibración.
- Asegurar que las condiciones ambientales son adecuadas para las operaciones de calibración, inspección, medida y ensayos que se efectúen en los instrumentos.

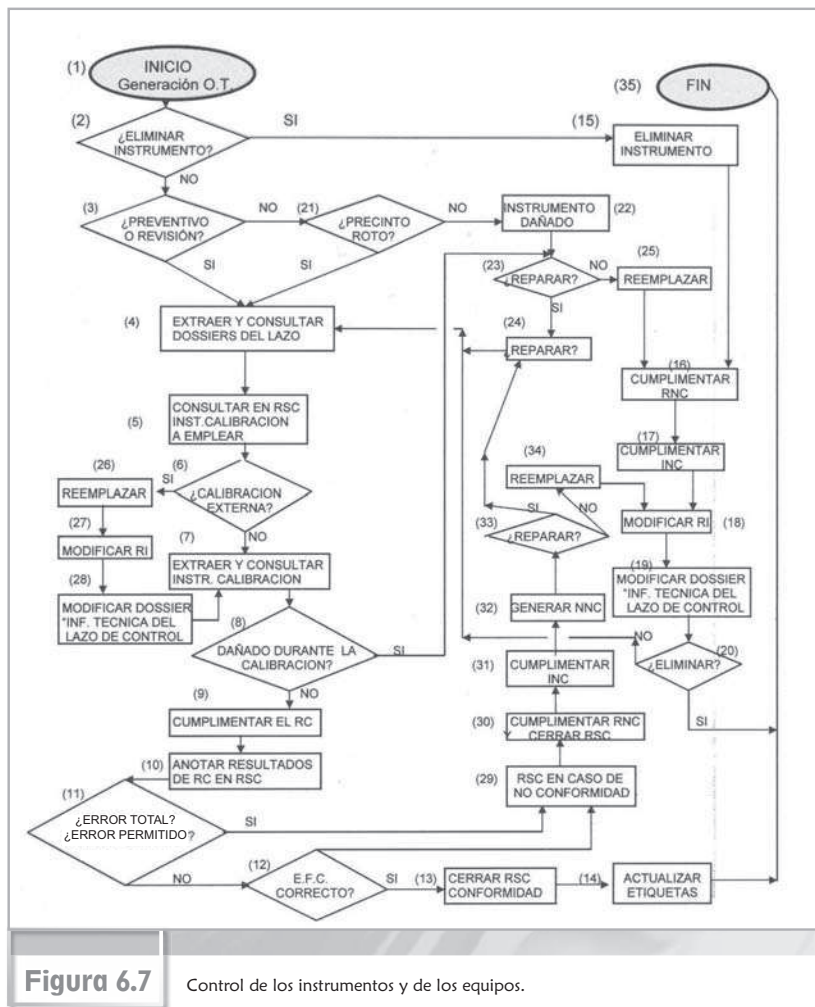
Asimismo, la empresa debe establecer una función metrológica, es decir una función con responsabilidad en la organización para definir e implementar el sistema de control de las mediciones. La implantación de la norma ISO 9000 presupone la redacción de manuales de calibración de los instrumentos afectados (clave en la obtención de la calidad esperada del producto fabricado por la empresa), la creación de procedimientos documentados para la calibración y la conformidad o no-conformidad de los instrumentos y equipos de calibración, el entrenamiento del personal destinado a la calibración ISO 9001, y la creación de un área separada dentro del taller de instrumentos donde se encontrarán ubicados los equipos y herramientas de calibración.

El período de calibración de cada instrumento es fijado por la propia empresa, de acuerdo con la experiencia que tenga sobre el trabajo en la planta. Normalmente suele ser de un año para los aparatos normales.

En la figura 6.7 puede verse un ejemplo de metodología a seguir en el control de los equipos de inspección, medición y ensayo.

Aparentemente la implantación de la norma ISO 9002 es sencilla, pero en realidad esta no es una tarea fácil. Es necesario que el equipo de calibración esté certificado por un organismo reconocido, que dicho equipo se calibre periódicamente, así como los instrumentos de medición y control afectados, que se identifiquen perfectamente

los instrumentos, que se entrene adecuadamente al personal y que todo ello esté perfectamente documentado. Supone una mentalidad totalmente nueva dentro de la empresa, englobando a todos sus departamentos y personal y contando con su convencimiento y con su aportación individual. Si no es así, será difícil conseguir una implantación adecuada.



**Figura 6.7**

Control de los instrumentos y de los equipos.

<b>1. Normas estándar ISO 9000</b>					
Standard/ document	Title	Edition	Publication Date	Comment	MSS Type
ISO 9000:2005	Quality management systems – Fundamentals and Vocabulary	Third	2005-09-15		C
ISO 10012:2003	Measurement management systems- Requirements for measurement processes and measuring equipment	Second	2003-04-14	Revised to merge ISO 10012-1 and	B
ISO/IEC 90003:2004	Software engineering – Guidelines for the application of ISO 9001:2000 to computer software	First	2004-02-11	Revised by ISO/IEC JTC1/SC7	B
ISO 10002	Quality management – Customer satisfaction – Guidelines for complaints handling in organizations	First	2004-07-01		C
ISO 10005:2005	Quality management - Guidelines for quality plans	Second	2005-06-01		C
ISO 10006:2003	Quality management - Guidelines for quality management in projects	Second	2003-06-15		B
ISO 10007:2003	Quality management - Guidelines for configuration management	Second	2003-06-15		C

<b>2. Documentos en desarrollo</b>					
Standard/ document	Title	Edition	Development stage	Comment	MSS Type
ISO 9001	Quality management systems – Requirements	Amendment	CD	Amendment in progress; CD to be issued early 2007	A
ISO 9004	Quality management systems – Guidelines for performance improvements (Note – proposals have been made to revise the title)	Third	CD	Revision in progress; CD to be issued early 2007	B
	Particular requirements for the application of ISO 9001:2000				
ISO 19011:2002	Guidelines on quality and/or environmental management systems auditing	First	2002-10-01		C

**Tabla 6.5**

Estándares de medida en procesos de la ISO 9000 (año 2006)

# Apéndice

## A.1 Diagramas de tuberías e instrumentos (P&IDs)

La norma ISA-S5.3-1983 documenta los instrumentos formados por ordenadores, controladores programables, miniordenadores y sistemas a microprocesador que disponen de control compartido, visualización compartida y otras características de interfase. Figuran algunos ejemplos de interés para el servicio de mantenimiento.

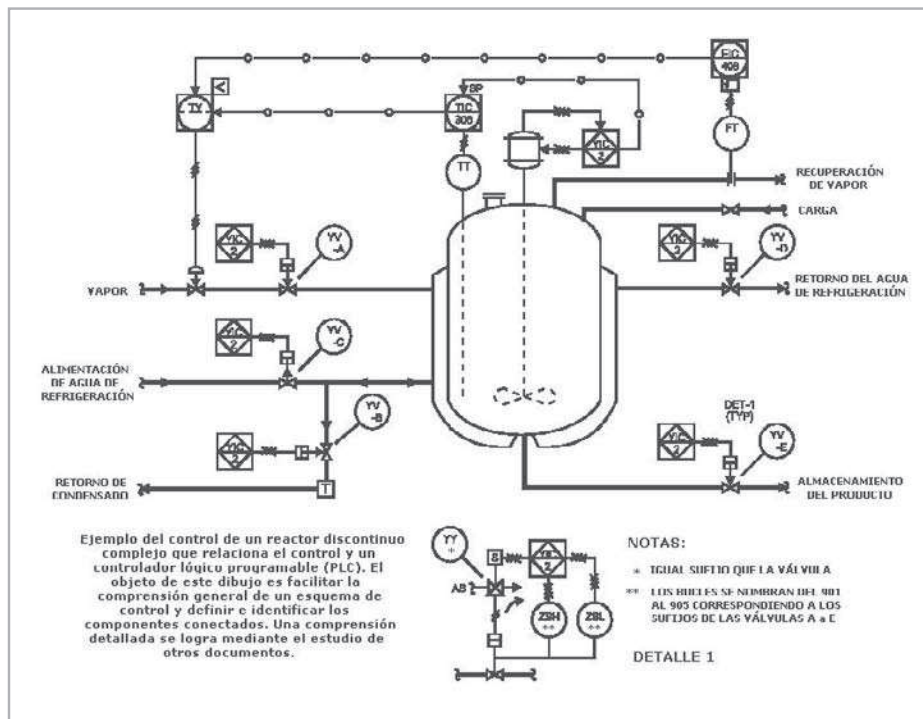
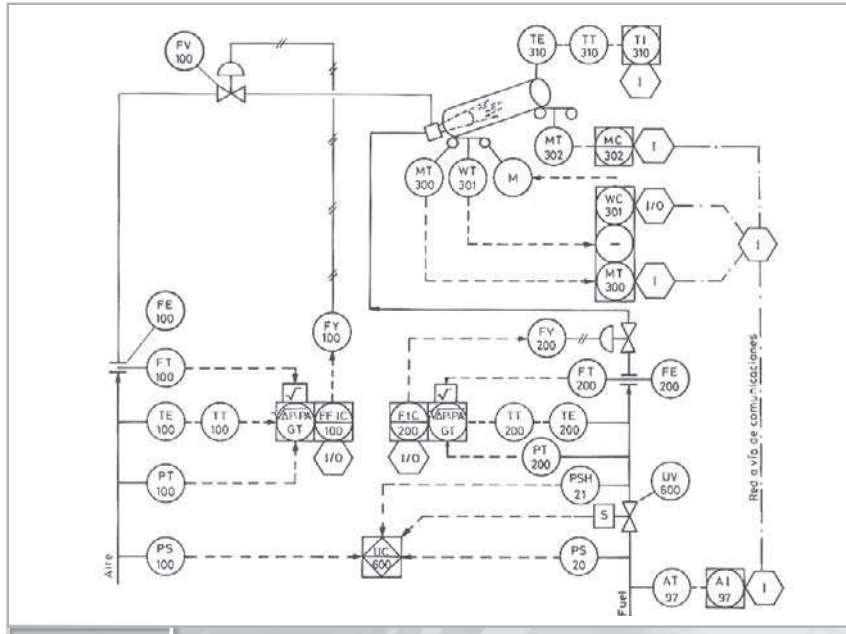
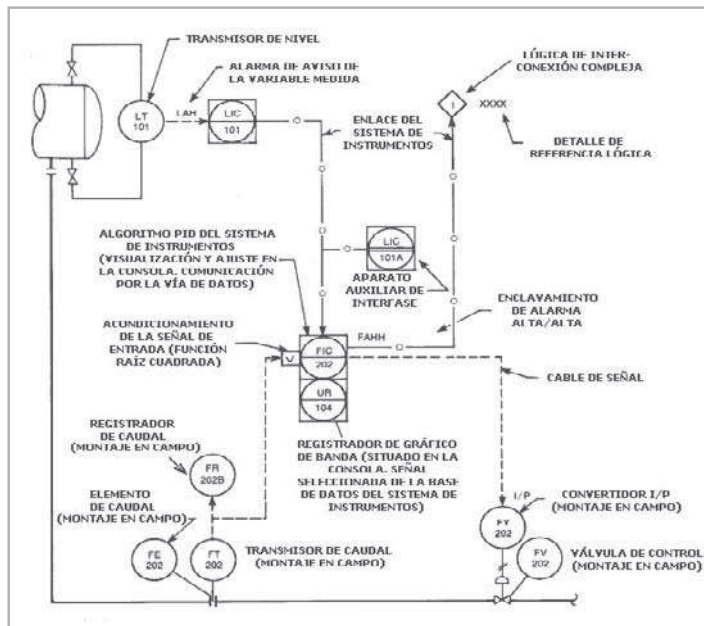


Figura A.1

Combinaciones complejas – Control de un reactor discontinuo.



**Figura A.2** Lazo de control - Control de combustión.



**Figura A.3** Diagrama de flujo y lógico de un control en cascada con alarmas.

## A.2 Diagramas de lazos de control

Los diagramas de lazos de control se utilizan ampliamente en la industria presentando en una hoja toda la información necesaria para la instalación, comprobación, puesta en marcha y mantenimiento de los instrumentos, lo que facilita la reducción de costes, la integridad del lazo, la exactitud y un mantenimiento más fácil del sistema.

Figuran a continuación algunos ejemplos de diagramas de lazos de control de la norma ISA-S5.4-1991.

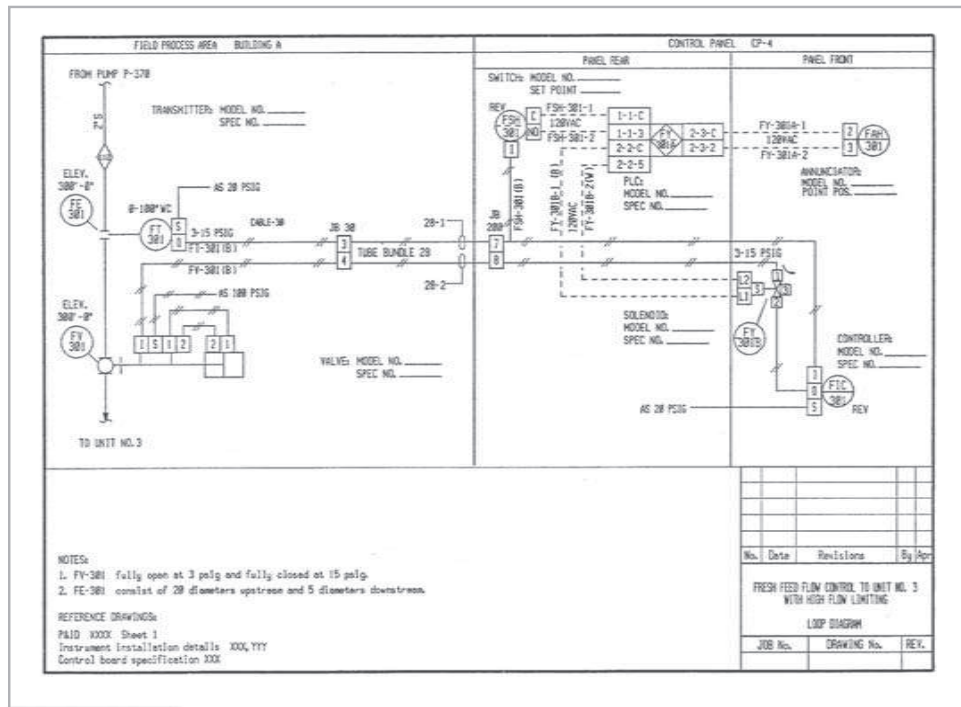
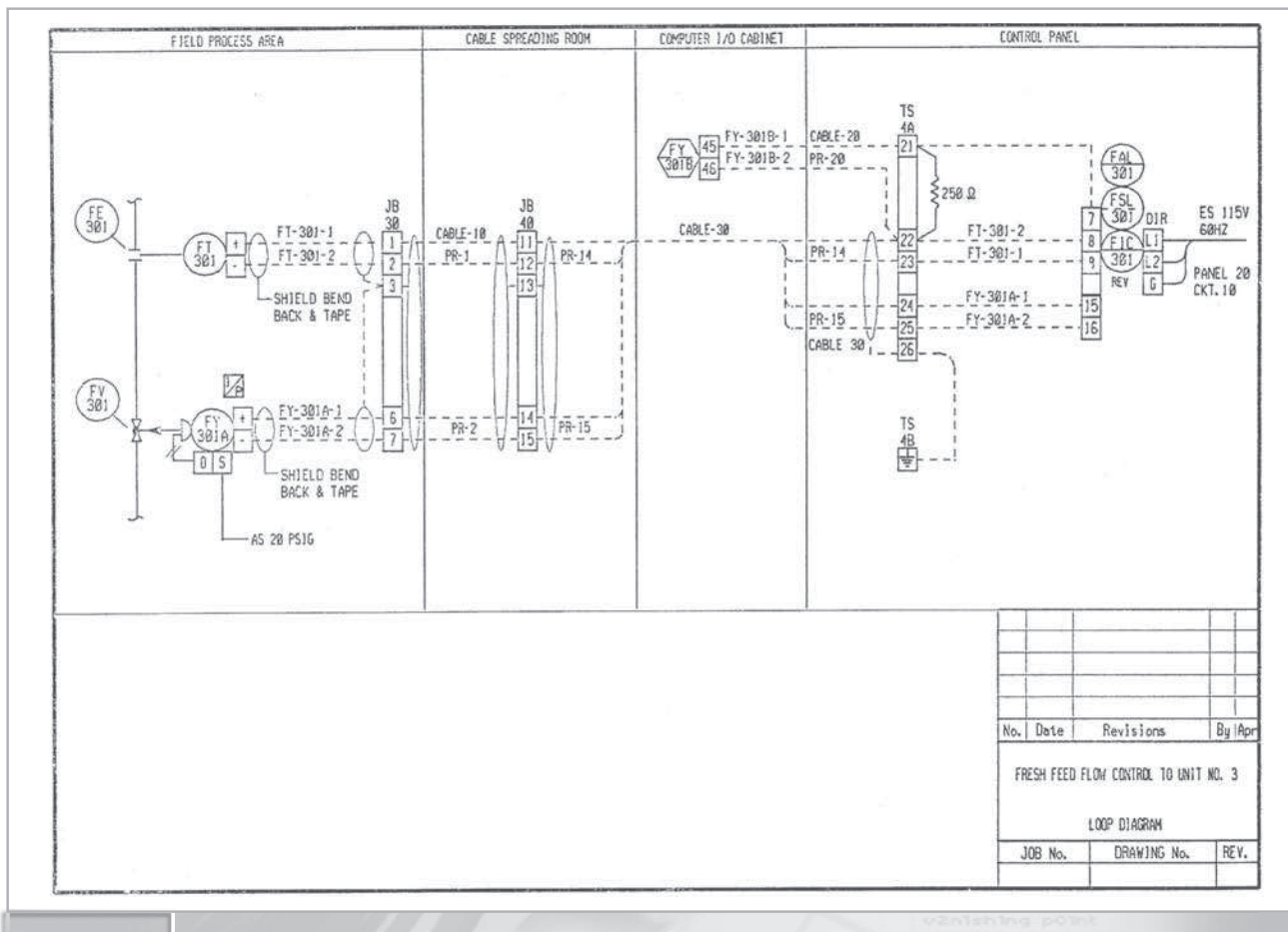


Figura A.4 Diagrama del control neumático



**Figura A.5** Diagrama de control electrónico

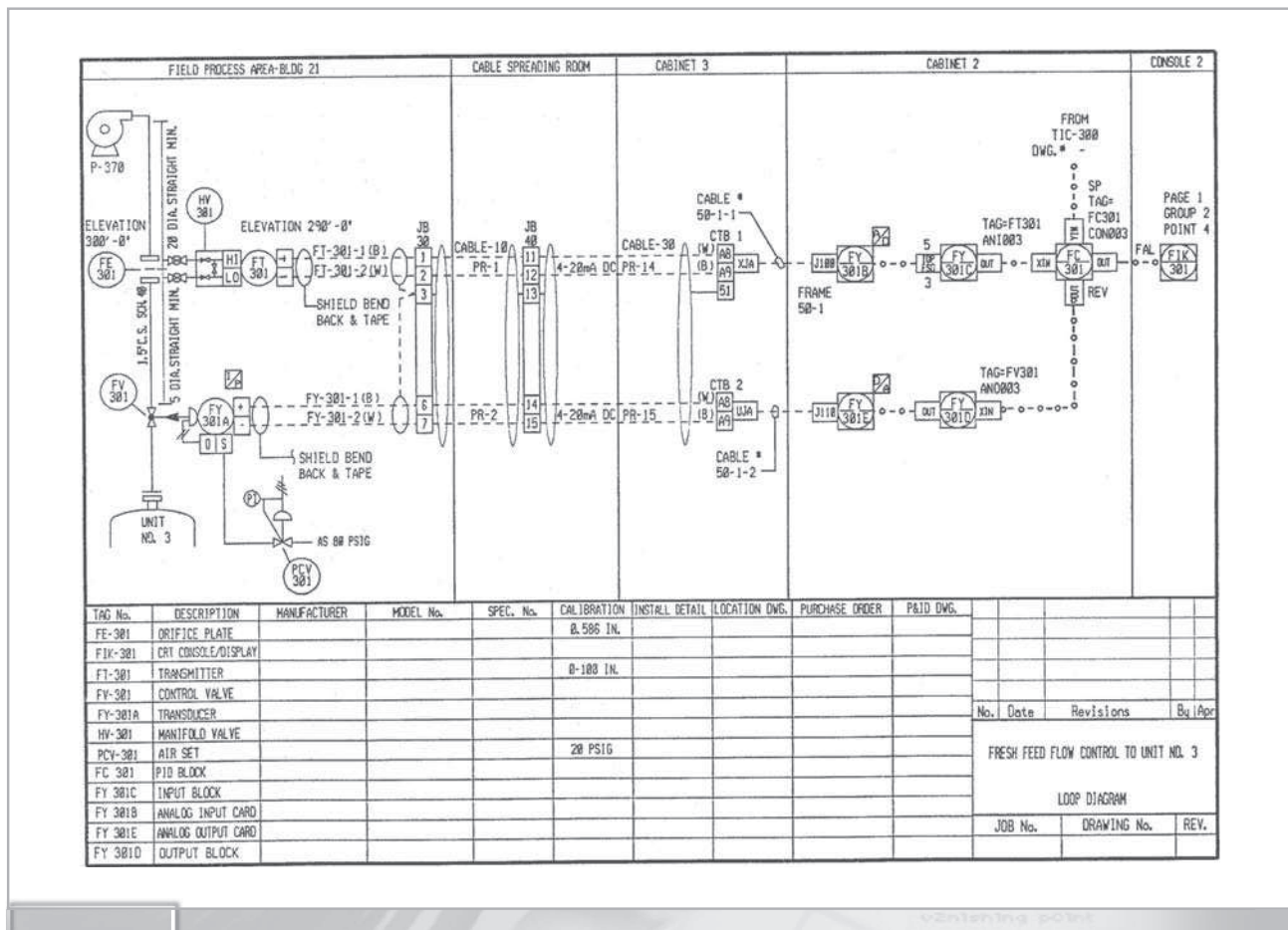


Figura A.6

Diagrama de control por ordenador

### A.3 Colores de visualización de procesos

La norma ANSI/ISA-S5.5-1985 (aprobada el 3 de febrero de 1986) normaliza el estándar de colores de visualización de procesos.

Color	Significado genérico	Elementos asociados
Negro	Emergencia	a) Paro
		b) Alarma de Muy Alta Prioridad
		c) Cerrado
		d) Desconectado (OFF)
Amarillo	Precaución	a) Condición anormal
		b) Alarma de Prioridad Secundaria
Verde	Seguridad	a) Operación Normal
		b) Arranque
		c) Abierto
		d) Conectado (ON)
Cyan (Azul Claro)	Estático y Significativo	a) Equipo de Proceso en Servicio
		b) Tarjetas Principales
Azul	No Esencial	a) Equipo de Proceso en Reserva
		b) Tarjetas, Tags, etc.
Magenta (Púrpura)	Radiación	a) Alarmas de Radiación
		b) Valores dudosos
Blanco	Datos Dinámicos	a) Información de Medida y de Estado
		b) Mensajes del Sistema
		c) Tendencias
		d) Paso Secuencial Activo

**Tabla A.1**

Colores Procesos en Panel (Norma ANSI/ISA-S5.1-1985)

## A.4 Hojas de especificación de instrumentos

### A.4.1 Instrumentos de presión

#### MANÓMETROS

Cantidad	Modelo	Fabricante	CÓDIGO/TAG
.....	.....	.....	.....
General			
Tipo	Indicador	Registrador	Alarma
Caja	Circular	....	
	Color		
	Material	AISI 316	Fenol
		Hierro	Aluminio
	Tamaño	100 mm	150 mm
	Esfera	Fondo blanco, cifras negras	
	Mecanismo	AISI 316	Bronce
	Aro	estándar ..	
Montaje	empotrado	superficie	local
Clasificación	general	estanco	
Exactitud	±1% ±0,5%	±0,3%	±0,1%

#### Elemento de presión

Tipo	Bourdon	Espiral	Fuelle
	Diafragma	Helicoidal	Otros

#### Intervalo de medida

Unidades	BAR	psi	Absoluto	Relativo
Conexiones		Roscada	1/2"	NPT
		Macho	Hembra	
		Inferior	Posterior	
	Bridas	Tamaño	Rating	
Elemento	Bronce	AISI 316	Acero	
Racord	Latón	AISI 316		

#### ALARMA

Consigna	Ajustable en toda la escala		
Interruptor	Microrruptor	Proximidad	
Acción	Alto		
	Abre	Cierra	Conmuta
	Bajo		

	Abre	Cierra	Conmuta
Capacidad ruptura	A.	V.	
Clasificación	General	Estando	A prueba explosión

---

**SEPARADOR**

Modelo			
Material cuerpo	En contacto con el fluido de proceso		
	AISI 316		
	En contacto con el líquido separador		
	Acero	AISI 316	
Membrana	AISI 316		
Conexión	Roscada	1/2"	NPT
		Macho	Hembra
Brida	Tamaño	Rating	

---

**Accesorios**

Baño de glicerina	Montaje empotrado en panel
Lira	Amortiguador de pulsaciones
Gráficos, tinta y plumilla	

---

**Condiciones de servicio**

Fluido	Clase		
	Presión normal	bar (abs)	
	Presión máxima	bar (abs)	
	Temperatura normal	°C	
	Temperatura máxima	°C	
	Densidad	... kg/m <sup>3</sup>	a. . . °C
	Viscosidad	... cps	a. . . °C . . . kg/cm <sup>2</sup>

---

**RECEPTORES DE PRESIÓN**


---

Cantidad	Modelo	Fabricante	CÓDIGO/TAG
....	.....	.....	.....

---

**General**

Tipo	Indicador	Registrador	Ciego
	Transmisor	Controlador	Alarma
Montaje	Empotrado	Superficie	Soporte
	Panel	Campo	
Gráfico	Circular	Banda alargada	
	Nº de puntos		
	Graduación	.....	Escala

	Tipo de pluma	Nº de plumas	
	Accionamiento	Eléctrico	Neumático
	Mecanismo de relojería		
	Interruptor	marcha-paro	
	Velocidad		
	Clasificación . . . . .	Contra explosión	
	Presión aire alimentación		Consumo (NI/min)
	Exactitud	. . . . .% final escala	
-----			
Elemento de presión			
Tipo	Bourdon	Espiral	Fuelle
	Diafragma	Helicoidal	Otros
Intervalo de medida			
Unidades	bar	psi	
	Absoluto	Relativo	
Conexiones	Roscada	½" NPT	
		Macho	Hembra
		Inferior	Posterior
	Bridas	Tamaño	Rating
Material	Bronce	AISI 316	Acero
-----			
Accesorios			
	Filtro manorreductor	Manómetro aire de alimentación	
	Indicador local	Accesorios de montaje	
	Lira	Amortiguador de pulsaciones	
	Gráficos, tinta y plumilla	Placa de características	
-----			
Transmisor			
Tipo	Neumático	0,2 - 1 bar	
	Electrónico	4-20 mA c.c	
	Digital	Protocolo HART	Foundation Fieldbus
	Protocolo PROFIBUS		
-----			
Controlador			
Tipo	Neumático	Electrónico	Digital
Acciones	Todo-nada		
	Proporcional	B.P. %	Ganancia
	Integral	minutos/rep	
	Derivada	minutos	
Salida	0,2-1 bar	4-20mA c.c	Digital
	Máxima impedancia de carga		
	Directa	Inversa	Reversible
Punto consigna	Manual	interno	externo

Alarma	Ajuste en toda la escala		
	Sobre la variable	desviación P.C.	
	Alarma de alta	Alarma de baja	
	Al aumentar la variable, el contacto de alta abre	cierra	conmuta
	capacidad de ruptura		
	Al aumentar la variable, el contacto de baja abre	cierra	conmuta
Clasificación	general	estanco	contra explosión

---

Condiciones de servicio

Fluido	Clase		
	Presión normal	kgs./cm <sup>2</sup> (abs)	
	Presión máxima	kgs./cm <sup>2</sup> (abs)	
	Temperatura normal	°C	Temperatura máxima °C
	Densidad	... kg/m <sup>3</sup> a.	.. °C. ... kg/cm <sup>2</sup>
	Viscosidad	... cps a. ... °C	... kg/cm <sup>2</sup>

---

#### A.4.2 Instrumentos de caudal

##### ESPECIFICACIÓN GENERAL

---

Cantidad	Modelo	Fabricante	CÓDIGO/TAG
.....	.....	.....	.....
General			
Tipo	Indicador	Registrador	Ciego
	Transmisor	Controlador	Alarma
Montaje	Empotrado	Superficie	Soporte
	Panel	Campo	
Gráfico	Circular	Banda alargada	
	Nº de puntos		
	Graduación	..... Escala	
	Tipo de pluma	Nº de plumas	
	Accionamiento	Eléctrico	Neumático
	Mecanismo de relojería		
	Interruptor marcha-paro		
	Velocidad		
	Clasificación	..... Contra explosión	
	Presión aire alimentación		
	Consumo (Nl/min)		

		Exactitud	. . . . % final escala		
-----					
Elemento					
Tipo	Turbina	Placa impacto	Cicloidal		
	Birrotor	Oval	Torbellino		
	Térmico	Axial	Coriolis		
Intervalo	Unidades	m <sup>3</sup> /h	l/min	kg/h	...
Conexiones	Roscada 1/2"	NPT			
	Macho	Hembra			
	Inferior	Posterior			
	Bridas	Tamaño	<i>Rating</i>		
Material	Acero	AISI 316			
-----					
Accesorios					
	Filtro manorreductor	Manómetro aire de alimentación			
	Indicador local	Accesorios de montaje			
	Filtro	Amortiguador de pulsaciones			
	Gráficos, tinta y plumilla	Placa de características			
-----					
Transmisor					
Tipo	Neumático	0,2 - 1 bar			
	Electrónico	4-20 mA cc			
	Digital	Protocolo HART	Foundation Fieldbus		
-----					
Protocolo PROFIBUS					
-----					
Controlador					
Tipo	Neumático	Electrónico	Digital		
Acciones	Todo-nada	Proporcional	B.P.%	Ganancia	
	Integral	minutos/rep			
	Derivada	minutos			
Salida	0,2-1 bar	4-20 mA cc	Digital		
	Directa	Inversa	Reversible		
Punto consigna	Manual	interno	externo		
Alarma	Ajuste en toda la escala	Sobre la variable	desviación P.C.		
	Alarma de alta	Alarma de baja			
	Al aumentar la variable, abre	el contacto de alta cierra	conmuta		
	capacidad de ruptura				
	Al aumentar la variable, abre	el contacto de baja cierra	conmuta		
Clasificación	general	estanco	contra explosión		
-----					

## Condiciones de servicio

Fluido	Presión normal	bar (abs)
	Presión máxima	bar (abs)
	Temperatura normal	°C
	Temperatura máxima	°C
	Densidad	... kg/m <sup>3</sup> a ... °C ... bar
	Viscosidad	... cps ... °C ... bar

## MEDIDORES MAGNÉTICOS DE CAUDAL

Cantidad	Modelo	Fabricante	CÓDIGO/TAG
.....	.....	.....	.....

## General

Tipo	Indicador	Integrador	Ciego
	Transmisor	Alarma	
Alimentación	Eléctrica	Conexiones	
	Exactitud	..... % final escala	

## Tubo de medida

Modelo	Tamaño	Material	Recubrimiento
	Electrodos	AISI 316	
Conexiones al proceso	Bridas	Material	
Clasificación			

## Transmisor

Tipo	Neumático	Electrónico	Digital
	0,2-1 kg/cm <sup>2</sup>	4-20 mA cc	
	Digital inteligente	Máxima impedancia	

## Condiciones de servicio

Fluido	Clase	
	Presión normal	kgs./cm <sup>2</sup> (abs)
	Presión máxima	kgs./cm <sup>2</sup> (abs)
	Temperatura normal °C	Temperatura máxima °C
	Densidad	... kg/m <sup>3</sup> a ... °C ... kg/cm <sup>2</sup>
	Viscosidad	... cps a ... °C ... kg/cm <sup>2</sup>

## Accesorios

Filtro manorreductor	Manómetro aire de alimentación
Indicador local	Accesorios de montaje
Filtro	Amortiguador de pulsaciones
Gráficos, tinta y plumilla	Placa de características

## INSTRUMENTOS DE PRESIÓN DIFERENCIAL

Cantidad	Modelo	Fabricante	CÓDIGO/TAG
.....	.....	.....	.....
-----			
General			
Tipo	Indicador	Registrador	Ciego
	Transmisor	Controlador	Alarma
Montaje	Empotrado	Superficie	Soporte
	Panel	Campo	
Gráfico	Circular	Banda alargada	
	Nº de puntos		
	Graduación	.....	Escala
	Tipo de pluma	Nº de plumas	
	Accionamiento	Eléctrico	Neumático
	Mecanismo de relojería		
	Interruptor marcha-paro		
	Velocidad		
	Clasificación	... contra explosión	
	Presión aire alimentación		
	Consumo (Nl/min)		
	Exactitud	...% final escala	
	Conexiones		
-----			
Elemento de presión diferencial			
Tipo	Caudal	Nivel	Presión
	Diafragma	Fuelle	Otros
Intervalo de medida			
Unidades	mm c.d.a	Metros	bar
Conexiones	Roscada	1/2"	
	NPT		
	Macho	Hembra	
	Inferior	Posterior	
	Bridas	Tamaño	Rating
Material	Acero	AISI 316	
-----			
Accesorios			
	Filtro manorreductor	Manómetro aire de alimentación	
	Indicador local	Accesorios de montaje	
	Manifold de 5 vías	Amortiguador de pulsaciones	
-----			
Transmisor			
Tipo	Neumático	0,2 - 1 bar	

	Electrónico Digital	4-20 mA c.c Protocolo HART	Foundation Fieldbus
Protocolo PROFIBUS			
-----			
Controlador			
Tipo	Neumático	Electrónico	Digital
Acciones	Todo-nada		
	Proporcional	B.P. %	Ganancia
	Integral	minutos/rep	
	Derivada	minutos	
Salida	0,2-1 kg/cm <sup>2</sup>	4-20 mA cc	Digital
	Máxima impedancia de carga		
	Directa	Inversa	Reversible
Punto consigna	Manual	interno	externo
Alarma	Ajuste en toda la escala	Sobre la variable	desviación P.C.
	Alarma de alta	Alarma de baja	
	Al aumentar la variable, el contacto de alta abre	cierra	conmuta
	capacidad de ruptura		
	Al aumentar la variable, el contacto de baja abre	cierra	conmuta
Clasificación	general	estanco	contra explosión
-----			
Condiciones de servicio			
Fluido	Presión normal	bar (abs)	
	Presión máxima	bar (abs)	
	Temperatura normal	°C	
	Temperatura máxima	°C	
	Densidad	. . . kg/m <sup>3</sup> a . .	. °C. . . kg/cm <sup>2</sup>
	Viscosidad.	. . cps a .	. °C. . . kg/cm <sup>2</sup>

#### A.4.3 Instrumentos de nivel

##### TRANSMISOR PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Cantidad	Modelo	Fabricante	CÓDIGO/TAG
.....	.....	.....	.....

##### General

Tipo	Transmisor	Soporte
Montaje	Bridas	

Elemento de presión			
Tipo	Diafragma	Inox 316	Hastelloy C
	Otro	Monel	Otros
Intervalo de medida			
Unidades	kPa	psig	otros
Conexiones	Bridas	Tamaño	Rating
Material	Acero	AISI 316	
Líquido de llenado	Silicona	Inerte	

Accesorios	
Válvula drenaje	Válvula venteo
Certificado área peligrosa	Accesorios de montaje

Transmisor			
Tipo	Neumático	0,2 - 1 bar	
	Electrónico	4-20 mA c.c	
	Digital	Protocolo HART	Foundation Fieldbus
Protocolo PROFIBUS			

Clasificación	General	Estanco	Contra explosión
---------------	---------	---------	------------------

Condiciones de servicio			
Fluido	Presión normal bar (abs)	Presión máxima bar (abs)	
	Temperatura normal °C	Temperatura máx. °C	
	Densidad . . . kg/m <sup>3</sup> a . .	. °C. . . kg/cm <sup>2</sup>	
	Viscosidad. . . cps a.	. °C. . . kg/cm <sup>2</sup>	

#### A.4.4 Instrumentos de temperatura

##### SONDAS DE RESISTENCIA

Cantidad	Modelo	Fabricante	CÓDIGO/TAG
.....	.....	.....	.....

##### General

Tipo	Vaina	Cabeza
Montaje	Bridas	Roscada

##### Elemento de resistencia

Tipo	Pt 100	Pt 500	
	Simple	Duplex	3 hilos
Vaina			
Tipo	Barra perforada	Tubo soldado	Diseño especial

Dimensiones	Longitud	Diámetro interno	Diámetro externo
Longitud inmersión		Longitud extensión	
-----			
Accesorios			
Bifurcación para salida duplex		Borne de masa	
Numeración terminales		Accesorios de montaje	
Placa de características			
-----			
TERMOPARES			
Cantidad	Modelo	Fabricante	CÓDIGO/TAG
.....	.....	.....	.....
-----			
General			
Tipo	Vaina	Cabeza	
Montaje	Bridas	Roscada	
-----			
Elemento de termopar			
Tipo	E (cromel-constantan)	T (cobre-constantan)	
	J (hierro-constantan)	K (cromel-alumel)	
	R (Pt-PtRd 13%)	S (Pt-PtRd 10%)	
-----			
Vaina			
Tipo	Barra perforada	Tubo soldado	Diseño especial
Dimensiones	Longitud	Diámetro interno	Diámetro externo
Longitud inmersión		Longitud extensión	
-----			
Accesorios			
Numeración terminales		Accesorios de montaje	
Placa de características		Borne de masa	

#### A.4.5 Instrumentos de otras variables

##### DENSIDAD

Cantidad	Modelo	Fabricante	CÓDIGO/TAG
.....	.....	.....	.....
-----			
General			
Elemento	Areómetro	Desplazamiento	Refractómetro
	Ultrasonidos	Inercial	Coriolis
Tipo	Transmisor	Controlador	Alarma

Montaje	Empotrado Panel	Superficie Campo	Soporte
-----			
Intervalo de medida			
Servicio	Sumergido	En línea	
Material	AISI 316		
Conexiones	NPT	Macho	bridas Hembra
Clasificación	general	estanco	Contra explosión
-----			

Transmisor

Tipo	Neumático	0,2 - 1 bar	
	Electrónico	4-20 mA cc	
	Digital	Protocolo HART	Foundation Fieldbus

Protocolo PROFIBUS

Condiciones de servicio

Fluido	Clase		
	Presión normal	kgs./cm <sup>2</sup> (abs)	
	Presión máxima	kgs./cm <sup>2</sup> (abs)	
	Temperatura normal	°C	Temperatura máxima °C
	Densidad	... kg/m <sup>3</sup> a.	.. °C... kg/cm <sup>2</sup>
	Viscosidad	... cps a. ... °C	... kg/cm <sup>2</sup>
	pH normal		

INSTRUMENTOS DE pH

Cantidad	Modelo	Fabricante	CÓDIGO/TAG
....	.....	.....	.....
-----			

General

Tipo	Indicador	Registrador	Ciego
	Transmisor	Controlador	Alarma
Montaje	Empotrado	Superficie	Soporte
	Panel	Campo	
Gráfico	Circular	Banda alargada	Nº de puntos
	Graduación . . . .	Escala	
	Tipo de pluma	Nº de plumas	
	Accionamiento	Eléctrico	Mecanismo de relojería
	Interruptor	marcha-paro	Velocidad
	Clasificación . . . . .	Contra explosión	
	Presión aire alimentación		Conexiones
-----			

Elemento de pH		Intervalo de medida		0 - 14	0 - 10
Electrodos	Referencia	Medida	Compensación temperatura		
Alojamiento electrodos:		Modelo			
Servicio	Sumergido	En línea			
Material	AISI 316				
Conexiones		NPT		Macho	Hembra
Sistema limpieza		Manual	Ultrasonidos		
Clasificación:		Líquido proceso			
		Eléctrico			
-----					
Accesorios					
Filtro manorreductor		Manómetro aire de alimentación			
Indicador local		Accesorios de montaje			
Gráficos, tinta y plumilla		Placa de características			
-----					
Transmisor					
Tipo	Neumático	0,2 - 1 bar			
	Electrónico	4-20 mA cc			
	Digital	Protocolo HART	Foundation		
			Fieldbus		
Protocolo PROFIBUS					
-----					
Controlador					
Tipo	Neumático	Electrónico	Digital		
Acciones	Todo-nada				
	Proporcional	B.P. %	Ganancia		
	Integral	minutos/rep			
	Derivada	minutos			
Salida	0,2-1 bar	4-20mA cc	Digital		
	Directa	Inversa	Reversible		
Punto consigna	Manual	interno	externo		
Alarma	Ajuste en toda la escala				
	Sobre la variable	desviación P.C.			
	Alarma de alta	Alarma de baja			
	Al aumentar la variable,	el contacto de alta			
	abre	cierra		conmuta	
	capacidad de ruptura				
	Al aumentar la variable,	el contacto de baja			

	abre general	cierra estanco	conmuta Contra explosión
-----			
Condiciones de servicio			
Fluido	Clase		
	Presión normal	kgs./cm <sup>2</sup> (abs)	
	Presión máxima	kgs./cm <sup>2</sup> (abs)	
	Temperatura normal	°C	Temperatura máxima °C
	Densidad	... kg/m <sup>3</sup> a.	.. °C. ... kg/cm <sup>2</sup>
	Viscosidad	... cps a. ... °C	... kg/cm <sup>2</sup>
	pH normal		

**A.4.6 Válvulas de control**

Condiciones de servicio				
Fluido	Líquido	Vapor	Gas	
Caudal (kg/h)	Máximo	Normal	Mínimo	
Presión entrada (bar)	Máxima	Normal	Mínima	
	p en bar	Máximo	Normal	Mínimo
Temperatura °C	Viscosidad (cps)	Densidad kg/m <sup>3</sup>		
Kv calculado/elegido				
Característica válvula	Lineal	Igual porcentaje		
Válvula de control	Neumática	Motorizada		
Cuerpo	Modelo			
Conexión al proceso	Bridas	ASA	Bridas DIN	
	Roscada			
Tamaño/Rating				
Forma de la brida	Plana	Con resalte	Machembrada	
Material	Hierro fundido	Acero al carbono	Acero inoxidable	
Tapa	Estándar	Extensión	Aletas radiación	
	Fuelle	Columna		
Empaquetadura	Teflón			
Partes internas				
Características obturador	Lineal	Igual porcentaje		
Asiento	Apertura rápida	Simple asiento	Doble asiento	
	Equilibrado			
Material asiento	Acero inoxidable	Endurecido		
Material obturador	Acero inoxidable	Endurecido		
Actuador				
Tipo	Neumático	Eléctrico	Hidráulico	
Acción fallo aire/corriente	Directa	Inversa		
Conexión aire	1/4 " NPT			
Alimentación eléctrica	220V 50 Hz			

Posicionador

Tipo                      Neumático                      Electrónico                      Digital

Montaje                      By-pass                      Manómetro

Accesorios                      Lateral                      Superior

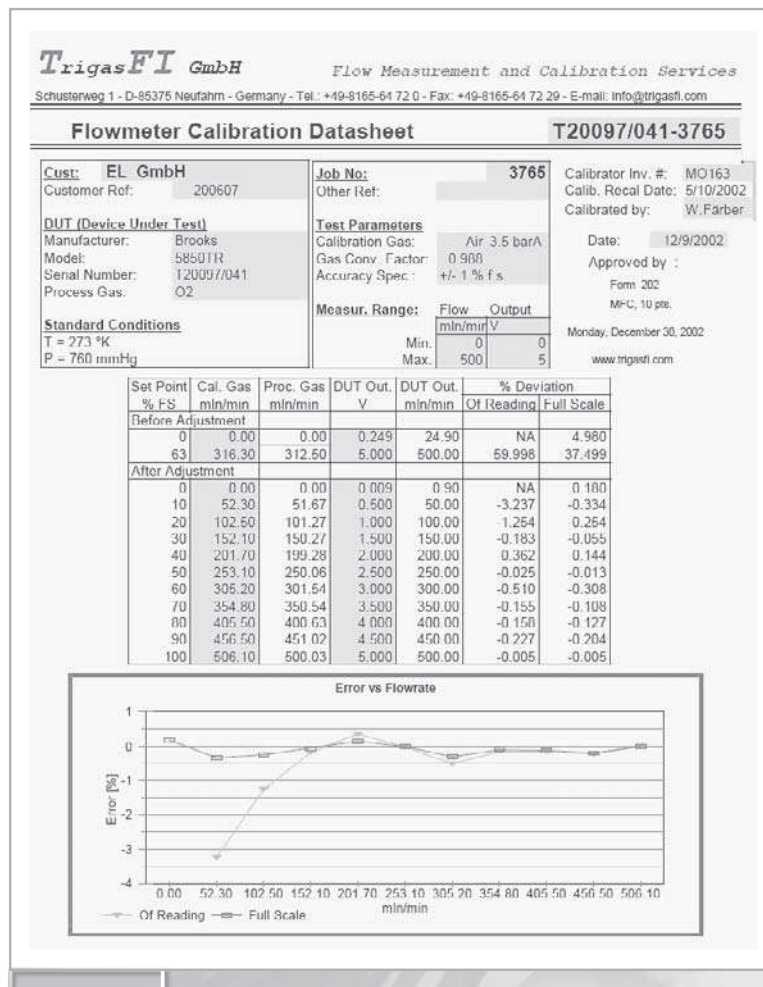
Filtro-manorreductor

Volante manual

Final de carrera

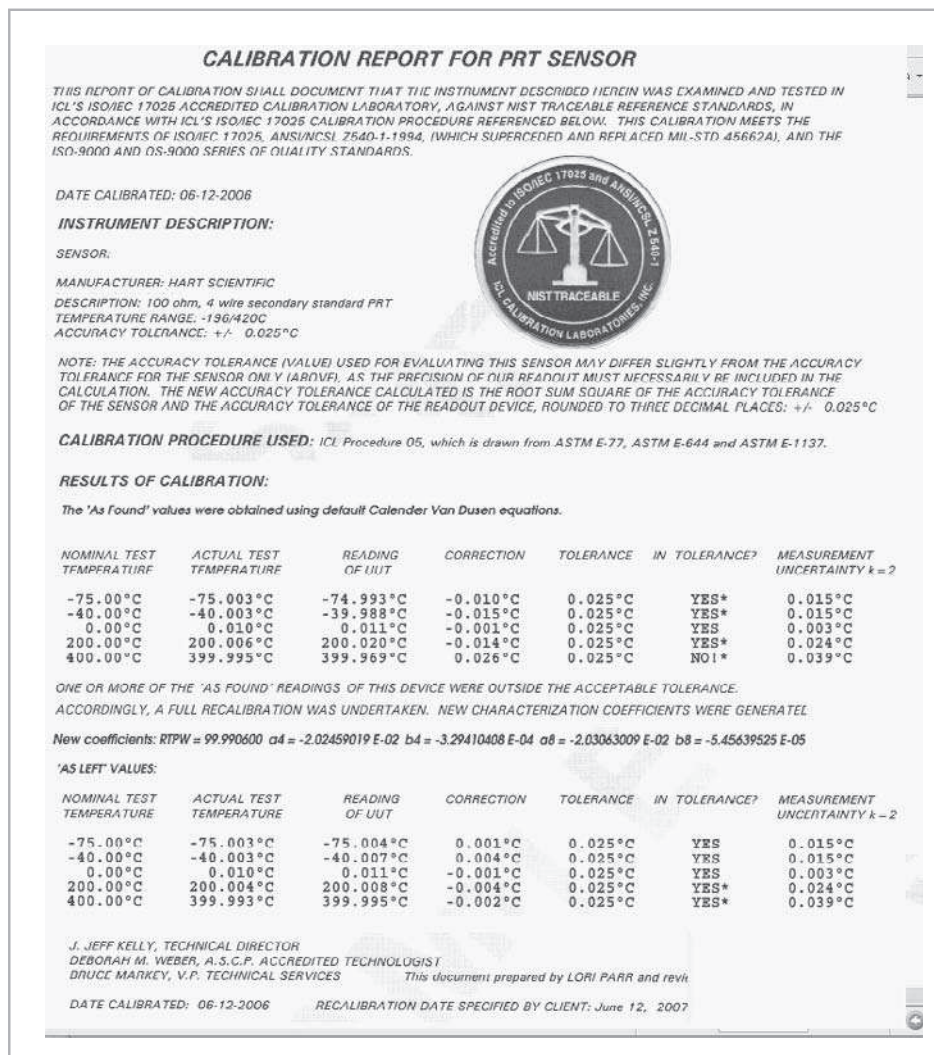
## A5. Hojas de calibración

Pueden verse hojas de calibración sobre diversos instrumentos.



**Figura A.7**

Hoja de calibración de un medidor de caudal de O<sub>2</sub>.  
Fuente: Trigas FI.



**Figura A.8**

Hoja de calibración de una sonda de resistencia.  
 Fuente: ICL Calibration Laboratories.

**CALIBRATION REPORT FOR THERMOMETER**

**INSTRUMENT DESCRIPTION:**  
 Serial No: 1542X    Inscription: ERTCD    Date calibrated: 06 12 2006    Scale: Celsius (Centigrade)  
 THERMOMETER ASTM 63C    Scale range: -8/32C    Scale divisions: .1 °C    Immersion: TOTAL  
 MODEL NO: 10063C-C  
 MAXIMUM SCALE ERROR PERMITTED BY ASTM E-1:  $\pm 0.1C$

**CALIBRATION PROCEDURE USED:** ICL Procedure 01, which is based upon ASTM E-77-98, NBS Monograph 150 & NIST SP 250-2

**RESULTS OF CALIBRATION:**

THE CAPILLARY OF THIS THERMOMETER WAS EXAMINED UNDER MAGNIFICATION WITH RESULTS AS FOLLOWS:  
 NO FOREIGN MATERIAL, MOISTURE, OR OTHER EVIDENCE OF CONTAMINATION WERE DISCOVERED. NO DISCERNABLE CAPILLARY IRREGULARITIES WERE NOTED.

TEST TEMP	READING	CORRECTION	TOLERANCE	IN TOL?	UNCERTAINTY
-7.00°C	-6.97°C	-0.03°C	0.10°C	YES	0.019°C
0.00°C	0.02°C	-0.02°C	0.10°C	YES	0.019°C
10.00°C	10.04°C	-0.04°C	0.10°C	YES	0.019°C
20.00°C	20.02°C	-0.02°C	0.10°C	YES	0.019°C
30.00°C	30.02°C	-0.02°C	0.10°C	YES	0.019°C

THE ABOVE READINGS WERE MADE UNDER MAGNIFICATION AND RESOLVED TO ONE TENTH OF ONE SCALE DIVISION.  
 THE TEST POINTS LISTED IN THE ABOVE TABLE ARE THOSE SPECIFIED IN ASTM E-1 (CURRENT REVISION).  
 THE INDICATIONS OF THIS INSTRUMENT COMPLY WITH THE ACCURACY TOLERANCE REFERENCED ABOVE.

**TRACEABILITY INFORMATION**

This calibration is traceable to NIST through an unbroken chain of comparisons. The reference standard is used to calibrate the transfer standard, which in turn is used to calibrate the client's instrument. Each step in the chain is fully documented, and measurement uncertainty at each step has been calculated.

Our NIST primary reference thermometer from -196 to 420C is a Hart Scientific model 5699, 25.5 Ohm SPRT, serial no. 0159, calibrated by NIST on October 7, 2003. NIST GMP-11 recommends a 36 month calibration cycle for SPRT's. Transfer standards PRT's are calibrated against this reference standard semi-annually; ASTM liquid-in-glass transfer standards are calibrated annually.

Our primary reference thermometer for temperatures from 500 to 1000C is a Hart Scientific model 5624 PRT sensor, serial no. 0105, MTC-243, calibrated by Hart Scientific.

Test Point	Comparator	MTE#	Manufacturer	Transfer Standard	MTE#	Manufacturer	Next Due
-7.00°C	9510 glycol bath	002	PolyScience	5614 PRT 576776	130	Hart Scientific	06/30/06
0.00°C	Tra point bath	000	Lab Glass	Intrinsic	222	Lab Glass	10/03/04
10.00°C	9501 glycol bath	010	PolyScience	5614 PRT 597010	135	Hart Scientific	06/30/06
20.00°C	9501 glycol bath	010	PolyScience	5614 PRT 597010	135	Hart Scientific	06/30/06
30.00°C	7912 water bath	223	Hart Scientific	5614 PRT 524105	127	Hart Scientific	06/30/06

**ICL CALIBRATION LABORATORIES, INC.**

An ISO/IEC 17025 & ANSI/NCSL Z-540-1 accredited laboratory - American Association for Laboratory Accreditation Certificate #328-01

J. JEFF KELLY, TECHNICAL DIRECTOR  
 DEBORAH M. WESER, A.S.C.P. ACCREDITED TECHNOLOGIST  
 BRUCE MARKEY, V.P. TECHNICAL SERVICES

This document prepared by LORI PARR and reviewed by KAREN ALLERBORN

DATE CALIBRATED: 06 12 2006    RECALIBRATION DATE SPECIFIED BY CLIENT: June 12, 2007

Figura A.9

Hoja de calibración de un termómetro.  
 Fuente: ICL Calibration Laboratories.

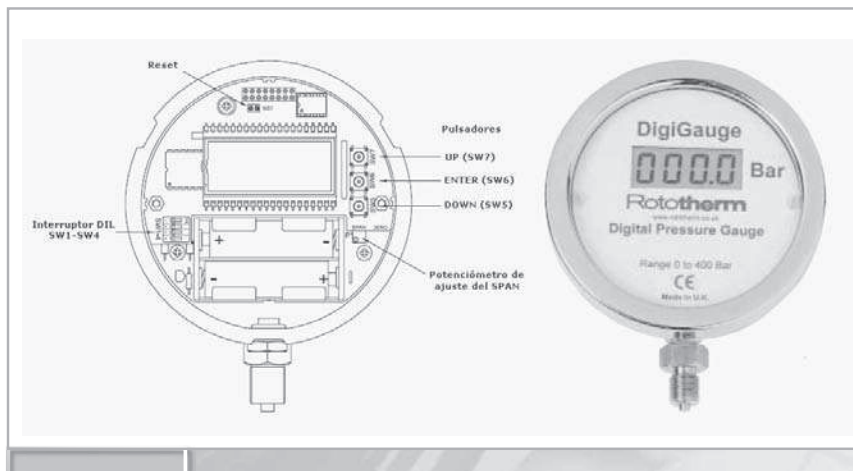
## A.6 Procedimientos de calibración

Figuran a continuación como guía general algunos ejemplos resumidos de calibración de instrumentos representativos. Siempre es conveniente disponer del manual del fabricante y seguir las instrucciones correspondientes del mismo.

### A.6.1 Calibración de un manómetro digital

Dado el tipo de manómetro que tiene una exactitud de 0,1 bar

La lectura del manómetro se actualiza cada 2 segundos (SW2 OFF) o bien cada 0,5 segundos SW2 (ON).



**Figura A.10** Manómetro digital.  
Fuente: Rototherm.

Calibración Manómetro Digital	
<b>Ajuste del cero</b>	
1	Manómetro abierto sin presión atmosférica.
2	Girar el tornillo de ajuste del potenciómetro de cero (ZERO) en el circuito impreso, hasta que la lectura sea 0000.
<b>Ajuste del span (multiplicación)</b>	
1	Aplicar la máxima presión (bar) que está indicada en la escala.
2	Girar el tornillo de ajuste del potenciómetro de multiplicación (SPAN) en el circuito impreso, hasta que la lectura sea igual al valor máximo de la escala. Girando el tornillo en el sentido de las agujas del reloj aumenta la lectura en la pantalla, y en sentido contrario la disminuye.
<b>Ajuste de la linealidad</b>	
1	Aplicar la mitad de la máxima presión de la escala.
2	Mover el interruptor SW3 a la posición ON (de la posición más a la izquierda a la posición más a la derecha).
3	Si el manómetro solo lee presiones positivas proceder al paso 4. Si es un manovacuómetro (presión y vacío) ir al paso 6
4	Mantenga pulsado el botón interruptor SW6 hasta que la lectura sea St.L y deje de pulsarlo. La pantalla mostrará Lin una vez más.
5	Mantenga pulsado el botón interruptor SW6 hasta que la lectura sea St.LP y deje de pulsarlo. La pantalla mostrará Lin una vez más.
6	En los manovacuómetros mueva el interruptor SW1 a la posición ON y SW2 a la posición OFF. La pantalla leerá ahora Lin.P.
7	Mantenga pulsado el botón interruptor SW6 hasta que la lectura sea St.LP y deje de pulsarlo. La pantalla mostrará una vez más Lin.P.
8	Mueva el interruptor SW1 a la posición OFF y SW2 a la posición ON. La pantalla leerá ahora Lin.P.
9	Aplice 0,750 bar de vacío (-0,750 bar) al manómetro. Mantenga pulsado el botón interruptor SW6 hasta que la lectura sea St.Ln y deje de pulsarlo. La pantalla mostrará una vez más Lin.n.
10	Retorne el interruptor SW3 a la posición OFF y SW1 y SW2 a sus posiciones originales. El manovacuómetro está ahora correctamente linealizado.

**Tabla A.2** Calibración de un manómetro digital

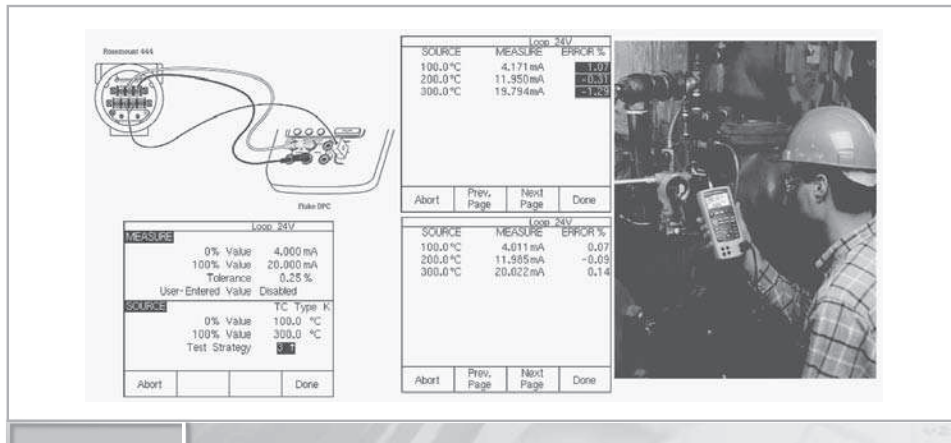
### A.6.2 Calibración de un transmisor electrónico de temperatura con elemento de termopar tipo K de 2 hilos

Datos del transmisor

Campo de medida (range) = 100 a 300 °C

Señal de salida = 4 – 20 mA c.c

Tolerancia = 0,25%



**Figura A.11**

Calibración de un transmisor de temperatura de termopar tipo K.  
Fuente: Fluke.

Calibración Transmisor de Temperatura de termopar tipo K (HART)	
1	Conectar un mini-conector tipo K en el calibrador y conectarlo a la entrada de termopar del transmisor.
2	Conectar en el centro del calibrador 2 hilos que conecten a los bornes de alimentación del transmisor.
3	Seleccionar el botón de mA.
4	Pulse el botón "MEAS/SOURCE" y oprima "TC/RTD". Con el cursor vaya a tc "K" y presione "ENTER"
5	Presione el botón "MEAS/SORCE" para pasar al modo de ventana partida.
6	Cumplimente los datos de la pantalla y presione "DONE".
7	Seleccione "Auto Test" y el calibrador aportará 100 °C, 200 °C y 300 °C, mientras mide 4, 12 y 20 mA cc (0%, 50% y 100%) de la señal de salida
8	En la pantalla del calibrador aparecerán los 2 valores de la fuente y de la medida y el error.
9	Seleccionando "Adjust" el calibrador suministrará 4 mA y si el error excede de 0,25% avisará presentandolo en video inverso. Se trata ahora de ajustar el cero del transmisor hasta reducir el error a menos de 0,25%.
10	Seleccionar "Go to 100%" y ajustar el tornillo de span (multiplicación) de forma análoga-También se puede comprobar con la señal al 50%, para comprobar la linealidad.
11	Una vez se ha completado el ajuste, seleccionar "As left", "Done", y "Autotest". Si el ajuste ha sido correcto los errores se presentarán en video normal.

**Tabla A.3**

Calibración Transmisor Temperatura de termopar tipo K (HART)

### A.6.3 Calibración de una válvula de control digital (protocolo HART)

Cada usuario tiene una cuenta con un nivel de privilegio que va de 0 a 9 y una contraseña (password). La válvula dispone de un software Valve que proporciona una interfase con Windows para operar, configurar, calibrar y diagnosticar posicionadores y controladores.

#### Modo normal

La válvula responde a la señal de 4 – 20 mA c.c con el interfase inteligente SVI (Smart Valve Interface) configurado como posicionador y responde al controlador SVI si este ha sido configurado como controlador.

La ventana visualiza en tiempo real la señal de entrada, la posición de la válvula, el punto de consigna y la presión en forma numérica y gráfica y los comandos HART.

#### Modo manual

La interfase no responde a la señal de entrada de 4 – 20 mA c.c Desde el modo manual puede pasarse al modo de Configurar, Calibrar o Diagnosticar.

La ventana visualiza en tiempo real la posición de la válvula y la presión del actuador y los comandos HART.

#### Modo configuración

La válvula permanece fija y no responde a la señal de 4 – 20 mA c.c Pueden modificarse los parámetros de configuración para disponer de alguna de las características de la válvula (lineal, isoporcentual, parabólica)

#### Modo calibración

Permite al usuario recalibrar la señal primaria y las señales de salida de los sensores. La válvula ha sido calibrada en fábrica y normalmente no necesita recalibración. Pero pueden fijarse:

Valor bajo y alto de la señal (mA) – Típicamente 4 mA c.c pero en el control por margen partido (*split range*) pueden seleccionarse por ejemplo 12 mA y 20 mA.

Límites de paro donde el actuador se vacía de aire y después se llena.

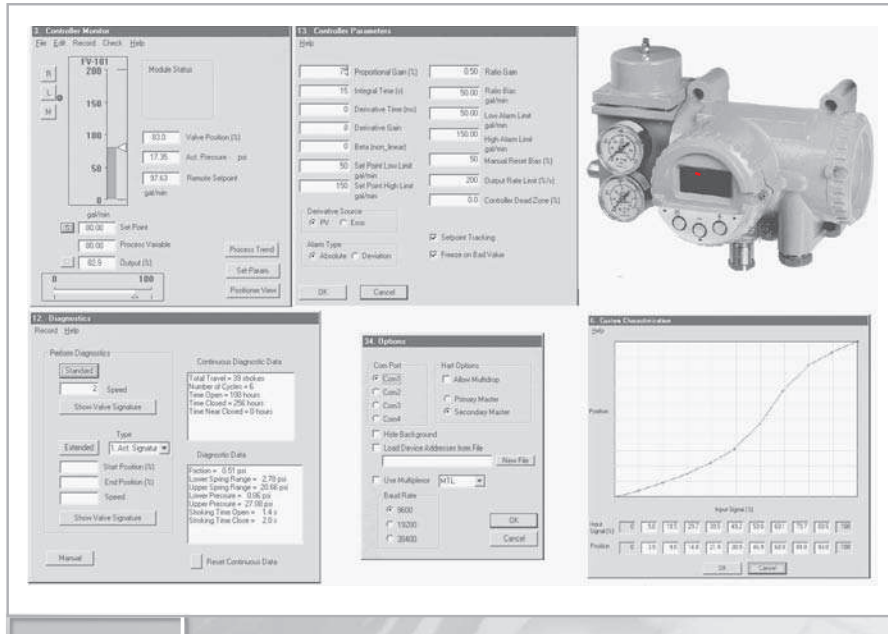
Ajuste del controlador, pudiendo sintonizar el controlador de la válvula al proceso manual o automáticamente.

Ajuste del posicionador, que se realiza en un tiempo de 3 a 12 minutos. La válvula debe estar en modo manual.

#### Modo diagnóstico

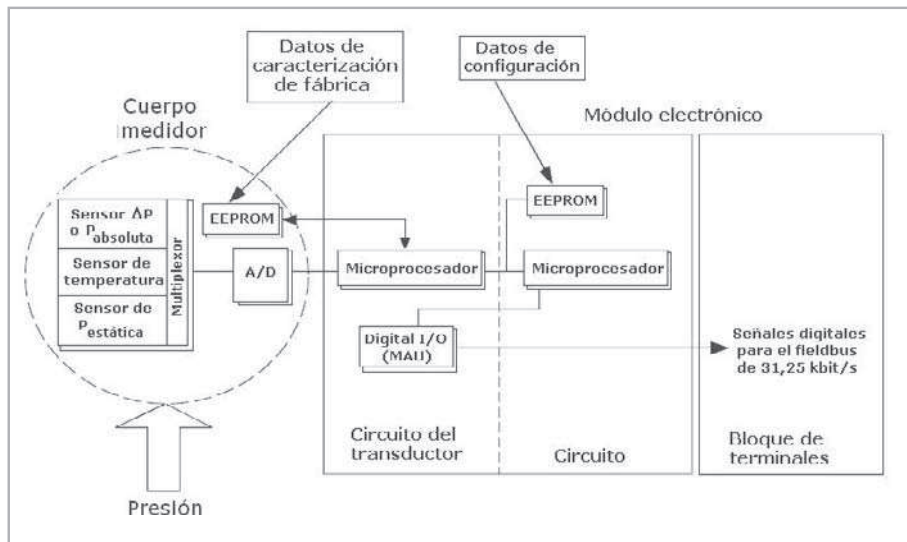
Presenta el recorrido total del vástago, el número de ciclos, el tiempo de apertura, el tiempo de cierre y el tiempo de la válvula en posición casi cerrada.

- Retorno a posición segura (*fail-safe*)
- Firma de la válvula y del poscionador
- Ventana del controlador con sus parámetros.
- Respuesta a un escalón.



**Figura A.12** Válvula inteligente protocolo HART.  
Fuente: Masoneilan.

### A.6.4 Calibración de un transmisor inteligente (protocolos HART y FIELDBUS)



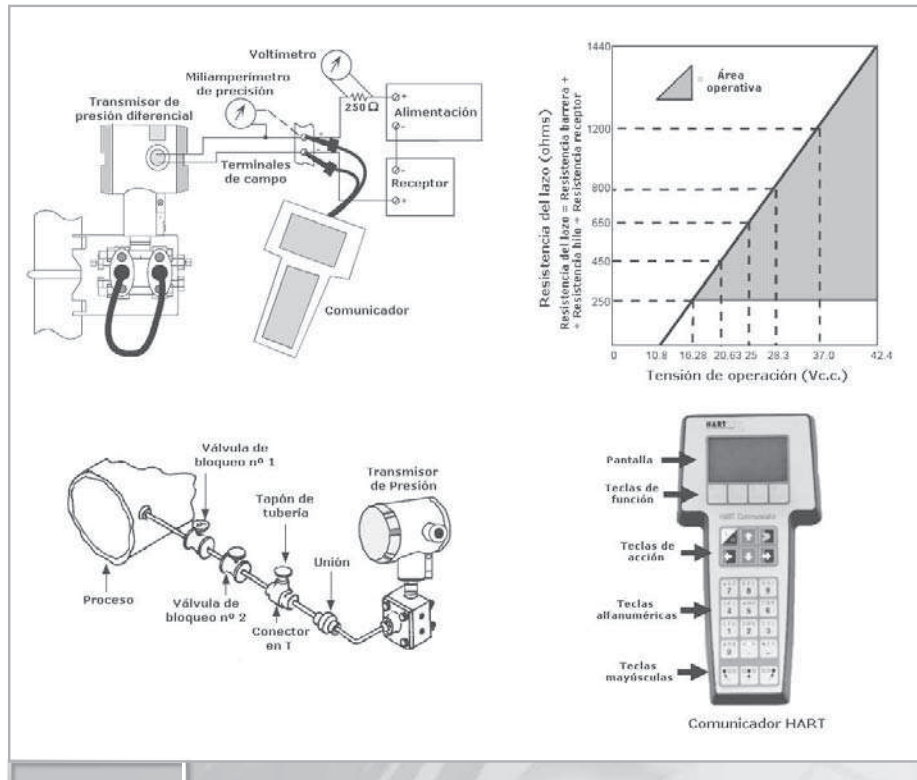
**Figura A.13** Diagrama de bloques del transmisor inteligente de presión ST3000.  
Fuente: Honeywell.

## Calibración tipo HART

<b>Calibración Transmisor Presión o Nivel (HART)</b>	
1	Conectar el comunicador y un miliamperímetro de precisión en el lazo.
2	Cerrar la válvula de bloqueo.
3	Sacar el tapón del conector en T para ventear el tubo a la atmósfera si es necesario.
4	En el menú "on-line" leer la presión de entrada aplicada (PV) que debe ser cero. Leer la señal de salida analógica de la variable (PV) que debe ser 4 mA que corresponde al 0% de señal de salida.
5	Poner el tapón en el conector en T y abrir lentamente la válvula de bloqueo para aplicar presión al transmisor.
6	Tomar las lecturas del comunicador y el miliamperímetro para comprobar que la señal de salida corresponde a las presiones de 0% y 100% de la escala.
7	Si las lecturas son 0% (4 mA) ir al paso 12
8	Si las lecturas no son 0% (4 mA) y el conector en T está a nivel del transmisor, ir al paso 10
9	Si las lecturas no son 0% (4 mA) y el conector en T está sobre el transmisor, ir al paso 11
10	Del menú "On-line" pasar por las siguientes selecciones: Device setup, Dig/Service, Calibration, Zero trim
	En Zero trim realizar:
	Sacar el lazo del control automático y pulsar OK.
	Pulsar OK cuando la pantalla avise que ello afectará la calibración del sensor.
	Pulsar OK cuando aparezca "Apply 0 input to sensor".
	Recibirá un mensaje diciendo que el sensor se está estabilizando y a continuación que el sensor está en cero.
	Volver al control automático. Pulsar OK.
	Ir al paso 12.
11	Del menú "On-line" pasar por las siguientes selecciones: Device setup, Dig/Service, Calibration, Apply values.
	La pantalla avisará de sacar el lazo del control automático. Pulsar OK para continuar.
	Cuando aparezca: Set: 1- 4mA, 2-20 mA, 3-Exit, selecciones 4 mA y pulse OK.
	Cuando aparezca "Current applied process value" selecciones "Set as 4 mA value" y pulse ENTER. Devuelva el lazo al control automático.
12	Poner el tapón en el conector en T y abrir lentamente la válvula de bloqueo para aplicar presión al transmisor.
13	Tomar las lecturas del comunicador y el miliamperímetro para comprobar que la señal de salida corresponde a las presiones de 0% y 100% de la escala.
14	Sacar el comunicador y el amperímetro del lazo.

**Tabla A.4**

Calibración Transmisor Presión o Nivel (HART)



**Figura A.14** Transmisor inteligente de presión y presión diferencial T3000 (HART).  
Fuente: Honeywell.

## Calibración FIELDBUS

### - Calibración de 2 puntos -

Al calibrar los dos puntos extremos del campo de medida (*range*), todos los puntos quedan ajustados a esta calibración.

Calibración de dos puntos	
1	Utilizando un configurador de fieldbus se desconecta el bloque transductor.
2	Se escriben las unidades de ingeniería correctas.
3	Escribir el punto bajo de la variable en CAL_POINT_LO.
4	Escribir el punto alto de la variable en CAL_POINT_HI.
5	Aplicar la presión baja al sensor.
6	Escribir el parámetro CAL_CMD un valor CAL_LOWER.
7	Aplicar la presión alta al sensor.
8	Escribir el parámetro CAL_CMD un valor CAL_UPPER.
9	Si la calibración tuvo éxito:
10	CAL_STATUS = Success (Éxito)
11	CAL_SOURCE = User (usuario). Pasar al siguiente paso.
12	Si la calibración falló:
13	CAL_STATUS = a value other than Success (un valor diferente de Éxito)
14	CAL_SOURCE = Value unchanged (valor sin cambios). Repetir el procedimiento desde el paso 1.

**Tabla A.5** Calibración de dos puntos (Fieldbus)

Restablecimiento de los valores de calibración de fábrica (Fieldbus)	
1	Utilizando un configurador de fieldbus se desconecta el bloque transductor.
2	Escribir el parámetro CAL_RESTORE al parámetro CAL_CMD para resturar los valores de fábrica.
3	Si la calibración tuvo éxito:
	CAL_STATUS = Success (Éxito)
	CAL_SOURCE = Factory. Pasar al siguiente paso.
4	Si la calibración falló:
	CAL_STATUS = Bad factory calibration (mala calibración de fábrica)
	CAL_SOURCE = value unchanged (valor sin cambios).
6	Cuando se ha completado la calibración:
	Situar el bloque del transductor en el modo Auto, para resumir la operación normal del aparato

**Tabla A.6** Restablecimiento de los valores de calibración de fábrica (Fieldbus)

**Anulación de los valores de fábrica y entrada de los valores de caracterización.**

Los valores de caracterización del instrumento corresponden a un modelo matemático de los sensores del transmisor, que se calculan y se guardan en la memoria del transmisor.

Esto es útil para corregir una desviación del cero (*offset*) y del campo de medida (*span*), debidas a la fase inicial de llenado de fluido y a los efectos de la posición del transmisor, una vez que se ha instalado y trabaja en las condiciones de operación del proceso.

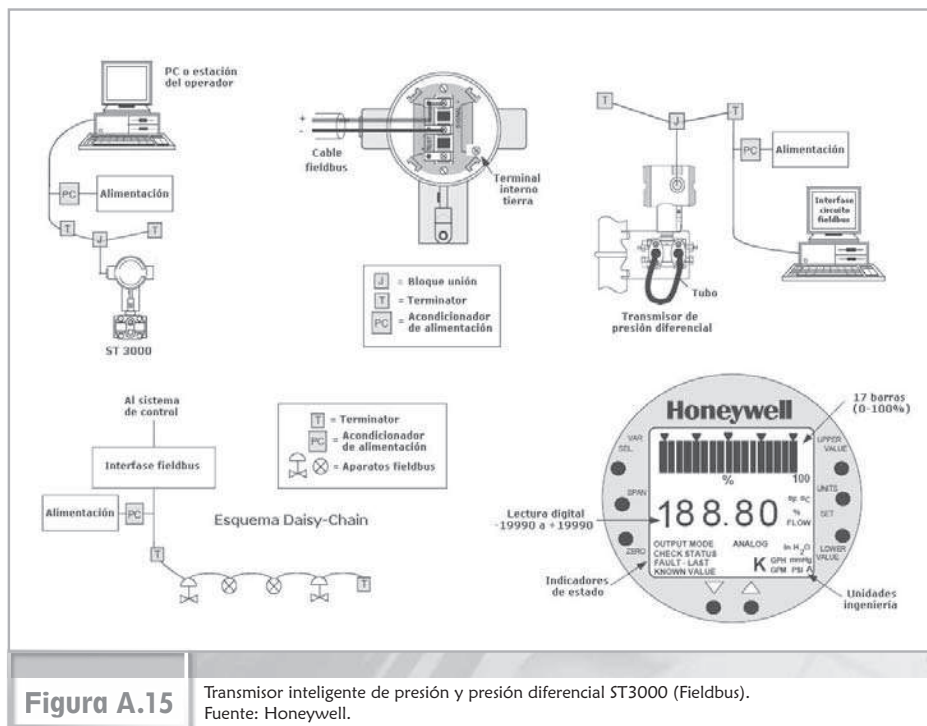
Por ejemplo, un *offset* típico del cero de 2,54 mm (0,1 pulgadas) en un campo de medida de 10,16 m c.d.a. (400") y una corrección típica del intervalo de medida (*span*) de 0,2%, representan una exactitud de:

$$Exactitud = 0,2\% + \left( \frac{\text{offset m c.d.a.}}{\text{Span m c.d.a.}} \right) * 100\% = 0,2\% + \left( \frac{2,54}{10,160} \right) = 0,2 \pm 0,025\%$$

Lo que indica que la exactitud final será prácticamente 0,2% o mejor.

### Configuración off-line

Se utiliza un software de configuración de fieldbus (NI-FUS) y se siguen los pasos de la tabla A.7.



Configuración <i>off-line</i>	
Pasos a seguir	Acciones
1	Conectar el cable del <i>fieldbus</i> al bloque de unión y a la tarjeta de interfase del PC- Atención: Observar la polaridad del cable del <i>fieldbus</i> en el circuito
2	Aflojar el bloque extremo y sacar la tapa del bloque terminal extremo del módulo electrónico.
3	Observar la polaridad y conectar el hilo positivo al terminal + y el hilo negativo al terminal -.
4	Conectar en el bloque de unión un terminator de <i>fieldbus</i> en paralelo con el transmisor /figura A.15
5	Conectar una fuente de alimentación, un acondicionador de alimentación (si es necesario) y un terminator de <i>fieldbus</i> en el cable del <i>fieldbus</i>
6	Conectar el PC
7	Conectar la alimentación al cable del <i>fieldbus</i>
8	Iniciar la configuración del <i>fieldbus</i> en el PC.
9	Una vez establecidas las comunicaciones entre el transmisor y el PC, comprobar el transmisor
10	Comprobar la identificación (ID) del aparato, del sensor (ID) y del transmisor (SENSOR_SN). Asignar una dirección del nodo del circuito al aparato y los nombres del código (tag) al aparato.
11	Pueden verse los parámetros del bloque que configuran el transmisor y entrar los nuevos valores del proceso y escribirlos en el aparato.

Tabla A.7

Calibración *off-line* del transmisor inteligente ST 3000 (*Fieldbus*).  
Fuente: Honeywell.

## A.7 Glosario

**Ajuste de calibración.** Operación que modifica las lecturas o señales de salida de un instrumento mejorando su corrección de calibración. El ajuste más característico es el de cero (ZERO) y multiplicación (*SPAN*).

**Ajuste de sintonización.** Operación cuyo objetivo es determinar el valor de las acciones de control (P, PI, PID) que mejor se ajustan a las características del proceso y permiten su recuperación ante perturbaciones.

**Alcance (*span*).** Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento. Ejemplo: en el campo 100-300. C vale 200. C.

**Alfanumérico.** Conjunto de caracteres que contienen letras y números.

**Amplificador.** Instrumento cuya señal de salida equivale a la señal de entrada incrementada y que se alimenta de una fuente distinta de la señal de entrada.

**Amplificador operacional.** Amplificador de c.c de alta ganancia que constituye la base de los controladores electrónicos.

- Banda proporcional. Porcentaje de variación de la variable controlada necesario para provocar una carrera completa del elemento final de control. Es el recíproco de la ganancia.
- Baud. Unidad de transmisión de datos en serie expresada en bits/segundo (bps)
- Bias o polarización. Excitación aplicada a cualquier instrumento para determinar su punto de trabajo.
- Bit. Unidad de información o dígito binario.
- Byte. Número binario de ocho dígitos que representa la cantidad de memoria requerida para almacenar un byte de datos.
- Calibración. Conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores indicados por un instrumento y el correspondiente valor del mensurando, materializado en un patrón utilizado como referencia. El proceso permite conocer la incertidumbre global del instrumento para todo el campo de medida, a partir de la incertidumbre del patrón. Las operaciones a realizar se pueden documentar en un método o procedimiento de calibración, específico de un equipo o familia de equipos.
- Campo de medida (*range* o rango). Espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida o de transmisión del instrumento. Es también el intervalo de valores que puede tomar la magnitud a medir con un equipo de medida, de manera que el error de medida, operando dentro de sus condiciones de empleo, sea menor que el máximo especificado para el mismo.
- Viene expresado estableciendo los dos valores extremos. Ejemplos: 0-150 °C; 100-300 °C, 0-50 bar.
- Campo de medida con elevación de cero. Campo de medida en el que el valor cero de la variable o señal medida es mayor que el valor inferior del campo. Ejemplos: -25 a 100°C, - 100 a 0°C.
- Campo de medida con supresión de cero. Campo de medida en el que el valor cero de la variable o señal medida es menor que el valor inferior del campo. Ejemplos: 20 a 100°C, 10 a 100 l/h.
- Capacitancia de Radio Frecuencia (RF). Medida de nivel por emisión de radiofrecuencia que detecta la diferencia de tiempo entre la señal emitida del emisor y el eco recibido por la reflexión sobre el fluido. El tiempo empleado por estas señales de transmisión y retorno es proporcional al nivel. La medida depende de la constante dieléctrica del material, por lo que es útil en la medida de nivel de materiales conductores y no conductores y de interfases.
- Certificado de calibración. Documento que informa de los resultados de la calibración.
- Ciclo de vida. Representa todas las fases del dispositivo, el diseño, la instalación, la operación, el mantenimiento y la comprobación.
- Compensación. Provisión de un aparato suplementario o de materiales especiales para contrarrestar fuentes conocidas de error.

- Computador. Ordenador. Aparato que recibe información de entrada y que la procesa dando una información de salida según un programa preestablecido.
- Computador digital. Computador en el que la información se representa en forma numérica.
- Conductividad. Recíproco de la resistividad.
- Consistencia. Propiedad que presenta un fluido de resistir los cambios permanentes de su forma al someterse a un esfuerzo de cortadura.
- Constante de Chauvenet. Criterio para el rechazo de medidas.
- Constante de tiempo. Es el valor  $T$  en la expresión de la respuesta a un escalón o a un impulso de un sistema de primer orden.  $T$  es el tiempo necesario para completar 63,2% del cambio total en la respuesta.
- Control adaptativo. Controlador que ajusta automáticamente sus parámetros para compensar los cambios que puedan producirse en el proceso. Existen el controlador adaptativo de modelo de referencia y el controlador adaptativo autosintonizable.
- Control anticipativo. Sistema de control en el que se miden una o más variables de entrada al proceso que pueden perturbar la variable controlada y se toma una acción de corrección en la variable manipulada a través del elemento final de control. Este tipo de control puede combinarse con otros tipos de control, usualmente con el de realimentación, para reducir las desviaciones  $d \sim$  la variable controlada.
- Control avanzado. Técnicas que se apartan del control convencional PID y que se aplican en procesos muy complejos, no lineales, con retardos importantes y acoplamiento entre las variables. Se emplean en general para mejorar el rendimiento económico del proceso.
- Control de gama partida. Sistema de control en el que una variable manipulada tiene preferencia con relación a otra u otras del proceso. Se consigue usualmente haciendo que los elementos finales de control actúen cada uno para una parte de la gama de valores de salida del controlador.
- Control de procesos discontinuos. Sistema de control en el que se elimina automáticamente la acumulación de la acción integral que tiene lugar en un controlador proporcional más integral cuando la variable controlada cae por debajo del punto de consigna durante un tiempo suficiente.
- Control de realimentación. Sistema de control en el que se compara una variable medida con un valor deseado (punto de consigna) y la señal de error obtenida actúa de tal modo que reduce la magnitud de este error.
- Control de relación. Sistema de control en el que una variable de proceso es controlada en una razón dada con relación a otra variable.
- Control derivativo. Forma de control en la que existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variable controlada y la posición del elemento final de control.
- Control digital directo (DDC). Sistema de control que realiza un aparato digital que establece directamente las señales que van a los elementos finales de control.

- Control distribuido. Control digital realizado «distribuyendo» el riesgo del control único por ordenador en varios controladores o tarjetas de control de tipo universal con algoritmos de control seleccionables por software. Los transmisores electrónicos de campo, las tarjetas de control y la estación del operador están unidos mediante una vía de comunicaciones en forma de cable coaxial y cada componente se ubica en el lugar más idóneo de la planta.
- Control en cascada. Sistema de control en el que la señal de salida de un controlador (primario) es el punto de consigna de otro controlador (secundario).
- Control estadístico del proceso (SPC). Monitoriza el comportamiento de las variables aleatorias que pueden conducir a problemas de control o a variaciones en la calidad de los productos fabricados, aplicando técnicas estadísticas.
- Control flotante. Forma de control en el que el elemento final se mueve a una velocidad única independiente de la desviación.
- Control integral. Forma de control en la que el elemento final se mueve de acuerdo con una función integral en el tiempo del error de la variable controlada con relación al punto de consigna. Elimina el *offset* inherente al control proporcional.
- Control integrado. Sistema de sistemas existentes o que puedan añadirse a una planta, conectados mediante una red de datos y cuyo objetivo es conseguir una información del conjunto de todos los niveles de decisión de la planta y al mismo tiempo tener una individualidad en cada uno de los sistemas. El buen control automático de la planta permite obtener los datos y resultados necesarios para el control físico y la gestión de la producción.
- Control multivariable. Tipo de control que compensa las perturbaciones en las variables del proceso y desacopla las mismas, de tal modo que si, por ejemplo, se cambia el punto de consigna de una de las variables sólo ésta queda afectada sin modificar o perturbar las restantes.
- Control óptimo. Sistema de control que cumple la llamada ley de control, es decir, la señal de salida del controlador hace mínima la función objetivo de diseño y los resultados deben ser óptimos.
- Control planificado. Adapta los parámetros del controlador en función del punto de operación en procesos no lineales.
- Control linealizador global. Linealización global en el espacio abarcado por los estados del proceso para aplicar técnicas lineales a una planta pseudolineal.
- Control por lógica difusa (*fuzzy*). La lógica difusa o borrosa es una forma de control que utiliza operadores para describir un sistema mediante reglas que utilizan términos como «el producto está un poco caliente», o «algo frío», o «muy caliente», o «justo lo caliente que deseamos».
- Control por redes neuronales. Forma de control que imita el funcionamiento de las neuronas del sistema nervioso. La señal procedente de las diversas entradas o «dendritas» genera excitación en la salida o «axón» de la neurona, siempre que se sobrepase un determinado umbral. Cada conexión neuronal (sinapsis) se caracteriza por un valor llamado peso que puede ser excitador (positivo), o inhibidor (negativo) del elemento del proceso.

- Control predictivo. Basado en el uso de modelos dinámicos del proceso establecidos de tal forma que permiten anticiparse y predecir las situaciones futuras del proceso con el objeto de utilizar esta información para modificar la estrategia actual de control.
- Control proporcional. Forma de control en la que existe una relación lineal entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control. La señal de salida de corrección es proporcional al error (variable – punto de consigna).
- Control proporcional de tiempo variable. Forma de control en la que existe una relación predeterminada entre el valor de la variable controlada y la posición media en tiempo del elemento final de control de dos posiciones. La relación entre el tiempo de conexión y el de desconexión es proporcional al valor de la variable controlada.
- Control robusto. Tolerancia o insensibilidad del controlador ante los cambios o perturbaciones que puedan presentarse en las condiciones de trabajo del proceso
- Control selectivo. Sistema de control en el que se selecciona automáticamente uno de varios controladores según el valor de sus variables de entrada, generalmente con el objeto de evitar daños en el proceso o en el producto.
- Control supervisor. Sistema de control en el cual los bucles de control operan independientemente sujetos a acciones de corrección intermitente a través de sus puntos de consigna.
- Control todo-nada. Forma de control en que el elemento final de control adopta dos posiciones fijas.
- Controlador. Instrumento que compara la variable controlada con un valor deseado y ejerce automáticamente una acción de corrección de acuerdo con la desviación.
- Controlador de acción directa. Controlador en el que la señal de salida aumenta (o disminuye) al aumentar (o disminuir) la señal de entrada.
- Controlador de acción inversa. Controlador en el que la señal de salida disminuye (o aumenta) al aumentar (o disminuir) la señal de entrada.
- Controlador programable. Instrumento basado en microordenador que realiza funciones de secuencia y enclavamiento de circuitos y, como complemento, funciones de control PID.
- Controlador universal. Basado en microprocesador sustituye al controlador convencional miniatura de panel. Realiza funciones de control PID, dispone de niveles de seguridad de protección de datos, acepta entradas universales (termopares, sondas de resistencia, mA, mV y voltios) y tiene varias opciones de comunicaciones.
- Convertidor, Instrumento que recibe una señal estándar y la envía modificada en forma de señal de salida estándar.
- Correctores. Aparatos que eliminan el retardo del proceso. Entre ellos se encuentran el corrector de Smith y el corrector de modelo de referencia.
- Corriente parásita. Corriente inducida en el cuerpo de una masa conductora por variación del flujo magnético.
- Cuerpo negro. Cuerpo que absorbe toda la energía radiante que recibe. Experimentalmente es un recinto cerrado provisto de una pequeña abertura.

- Decibelio. Unidad sin dimensiones que expresa el cociente de dos valores de señal. Equivale a diez veces el logaritmo en base 10 del cociente de potencias, con la potencia de referencia seleccionada arbitrariamente en 10-16 vatios/cm<sup>2</sup>.
- Deriva. Variación de la señal de salida que se presenta en un período de tiempo determinado mientras se mantienen constantes la variable medida y todas las condiciones ambientales. Viene expresada en tanto por ciento del alcance. Ejemplo: 0,2% de 100 =  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$  (campo 50-150°C).
- Desviación típica. Raíz cuadrada positiva de la varianza de una variable aleatoria.
- Diafragma. Elemento sensible formado por una membrana colocada entre dos volúmenes. La membrana es deformada por la presión diferencial que le es aplicada.
- Display. Presentación visual de una señal.
- División de escala. Intervalo entre dos valores consecutivos de la escala.
- Elemento final de control. Recibe la señal del controlador y modifica el caudal del fluido o agente de control. La válvula de control es el elemento final típico.
- Elemento primario. Convierte la energía de la variable medida en una forma adecuada para la medida (fuerza, movimiento).
- Elevación de cero. Cantidad con que el valor cero de la variable supera el valor inferior del campo. Ejemplo: en el campo - 25 a 100° es 25°C, o bien  $(25/125) \times 100 = 20\%$ .
- Emisividad. Relación entre el grado de variación de energía radiante de una parte opaca pulida de un cuerpo y el correspondiente a la misma área de un cuerpo negro, ambos a la misma temperatura.
- Energía radiante. Energía formada por ondas electromagnéticas.
- Error. Diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida.
- Error absoluto convencional. Es el hallado a través de un muestreo estadístico de un gran número de mediciones, y que se adopta como valor verdadero convencional.
- Error aleatorio. Resultado de una medición menos el valor medio que resultaría de un número infinito de medidas del mensurando, realizadas en condiciones de repetibilidad. Como no es posible realizar un número infinito de medidas, solo es posible determinar un estimado del error aleatorio. Este error permanece, incluso después de calibrar el instrumento.
- Error sistemático. Valor medio que resultaría de un número infinito de medidas del mismo mensurando que se llevan a cabo en las mismas condiciones de repetibilidad menos el valor del mensurando. Este error permanece constante o varía de acuerdo con alguna ley cuando el sensor está midiendo el mismo valor y puede eliminarse por calibración.
- Error de angularidad. Desviación de los puntos de la curva de los valores de salida del instrumento con relación a la recta que relaciona la variable de entrada con la salida de un instrumento ideal sin error y coincidiendo los dos en los puntos 0 y 100% del campo de medida.

- Error de cero. Desplazamiento constante de todos los valores de salida del instrumento con relación a la recta que relaciona la variable de entrada con la salida de un instrumento ideal sin error.
- Error de multiplicación. Aumento o disminución progresiva de todos los valores de salida del instrumento con relación a la recta que relaciona la variable de entrada con la salida de un instrumento ideal sin error.
- Estabilidad. Capacidad de un instrumento para mantener su comportamiento durante su vida útil y de almacenamiento especificadas.
- Exactitud (*accuracy*). Grado de aproximación de una medida al valor verdadero de la cantidad que se mide. En otras palabras, es la cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida.
- Factor de cobertura (*k*). Factor numérico utilizado como multiplicador de la incertidumbre típica de medida para obtener una incertidumbre expandida con un nivel de confianza determinado. Si el número de mediciones es inferior a 20, *k* se sustituye por la *t* de Student. Por ejemplo, para  $k = 2$  se tiene una incertidumbre expandida ( $k * uc$ ) con un nivel de confianza del 95,45%. Si el número de mediciones es 10 la *k* se sustituye por la  $t = 2,262$  (Student) para un nivel de confianza de 95%.
- Fiabilidad. Medida de la probabilidad de que un instrumento continúe comportándose dentro de límites especificados de error a lo largo de un tiempo determinado y bajo condiciones especificadas.
- Fieldbus. Protocolo de bus de datos digital, serie y multipunto entre dispositivos de campo y/o sistemas de un entorno industrial, diseñado para sustituir a los sistemas de señales analógicas de 4 – 20 mA c.c y obtener más información sobre el proceso y sobre el propio instrumento, y establecer reglas de rendimiento, seguridad y detección de errores.
- Fluido o agente de control. Es el proceso, energía o material correspondiente a la variable manipulada.
- Foundation Fieldbus (FF). Organización sin ánimo de lucro formada por los casi 120 proveedores y usuarios más importantes de automatización y control de procesos, cuyo objetivo es el desarrollo de un circuito de comunicaciones digital estándar para aplicaciones de control de procesos.
- Frecuencia. Número de ciclos por unidad de tiempo. Es el recíproco del período.
- Galga extensométrica. Convierte la variable medida en una variación de resistencia debida a la deformación en dos o en los cuatro brazos de un puente de Wheatstone.
- Galvanómetro. Instrumento que mide una pequeña corriente eléctrica a partir de fuerzas electromagnéticas o electrodinámicas que se traducen en un movimiento mecánico.
- Ganancia. Es la relación de magnitudes entre la señal de salida resultante y la señal de entrada de excitación.
- HART (Highway Addressable Remote Transducer). Protocolo de comunicaciones híbrido que modula en frecuencia una señal de  $\pm 0.5$  mA de amplitud superpuesta

a la señal analógica de salida del transmisor de 4-20 mA cc. Codifica en forma senoidal los estados lógicos 1 y 0 con las frecuencias de 1.200 Hz para el 1 y 2.200 Hz para el 0. Como la señal promedio de una onda senoidal es cero, no se añade ningún componente de c.c a la señal analógica de 4-20 mA cc

Histéresis. Diferencia máxima en los valores de salida del instrumento para el mismo valor cualquiera del campo de medida cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos ascendente y descendente. Viene expresada en tanto por ciento del alcance. Ejemplo:  $\pm 0,3\%$  de 50 =  $\pm 0,15$  bar (campo 0-50 bar).

IEC 61508 (o 61511 específica para procesos industriales). Norma que define los niveles de riesgo de las aplicaciones y los requisitos que deben cumplir los sistemas de control adecuados a cada nivel.

Incertidumbre de la medida (*uncertainty*). Intervalo en el que se encuentra, con una elevada probabilidad, el valor convencionalmente verdadero de la medida.

Resultado de una operación de calibración, en la que se compara el instrumento a calibrar con un aparato patrón para averiguar si el error se encuentra dentro de los límites dados por el fabricante del instrumento. Como el aparato patrón no permite medir exactamente el valor verdadero (también tiene un error) y como además en la operación de comparación intervienen diversas fuentes de error, no es posible caracterizar la medida por un único valor, lo que da lugar a la llamada incertidumbre de la medida o incertidumbre (*uncertainty*).

Incertidumbre expandida  $U$ . Magnitud que expresa la incertidumbre en forma de intervalo dentro del cual existe una alta probabilidad de acertar. Para ello, se multiplica la incertidumbre típica  $u$  por un número  $k$  llamado factor de cobertura, obteniéndose la llamada incertidumbre expandida  $U = u \cdot k$ .

Incertidumbre tipo A. Método de evaluación de la incertidumbre de medida por análisis estadístico de una serie de observaciones repetidas, considerando que la distribución de probabilidades de las medias de dichas variables es la curva de Gauss o de distribución normal en forma de campana. De este modo, la media aritmética es el valor estimado de la variable, mientras que la desviación estándar representa el grado de dispersión de los valores de la variable que se miden repetitivamente.

Incertidumbre tipo B. Método de evaluación de la incertidumbre de medida por otro medio diferente al análisis estadístico de una serie de observaciones. Se basa en la experiencia y en conocimientos generales y se realiza cuando no se dispone de una serie repetida de mediciones, o cuando el método de medición es muy difícil, y no es posible calcular la incertidumbre tipo A.

Infrarrojo. Zona del espectro electromagnético comprendida entre 0,78 a 300 micras.

ISA. Sociedad Internacional de medida y control (Inicialmente Instrument Society of America).

ISO 9000. Conjunto de normas que exigen procesos adecuados (con o sin procedimiento documental), siendo uno de sus objetivos principales el aumento de la satisfacción del cliente. Entre los estándares figuran:

ISO 9000- Fundamentos de la gestión de la calidad y terminología.

- . ISO 9001 - Requisitos del proyecto, fabricación, instalación y servicios de productos
  - . ISO 9004 - Sistemas de dirección y organización de la calidad.
  - . ISO 19011 - Auditorias de gestión de calidad y gestión ambiental.
- Lazo abierto de control. Es el camino que sigue la señal sin realimentación.
- Lazo cerrado de control. Camino que sigue la señal desde el controlador hacia la válvula, al proceso y realimentándose a través del transmisor hacia un punto de suma con el punto de consigna.
- Linealidad. Grado con que una curva se aproxima a una línea recta o desviación de la señal de respuesta de un instrumento con relación a una línea recta.
- Memoria. Aparato en el que puede introducirse información y extraerse más adelante.
- Mensurando (*measurand*). Magnitud concreta objeto de la medición. La especificación completa del mensurando, es decir, lo que se ha medido, requiere especificar las variables (presión, temperatura, humedad, etc) que pueden afectar a su valor.
- Micra. Unidad de longitud igual a  $10^{-6}$  metros.
- Offset. Desviación permanente que existe en régimen en el control proporcional cuando el punto de consigna está fijo.
- OSI (Open Systems Interconnections). Protocolo de comunicaciones, propuesto por ISO (Organización Internacional de Normalización) y formado por varios niveles. Uno de ellos, el de usuario, normaliza las funciones básicas de todos los instrumentos de tal manera que aparatos de distintos fabricantes son intercambiables.
- Patrón. Elemento cuyo valor verdadero convencional es aceptado. Al realizar varias mediciones de la variable captada por un instrumento, la diferencia entre el promedio de los diferentes resultados y el valor verdadero convencional permite corregir los resultados de las mediciones efectuadas con el instrumento, mientras que la desviación típica del conjunto de resultados, o un múltiplo aceptado de ella, constituye la incertidumbre.
- Piezolectricidad. Propiedad que tienen algunos cristales naturales o artificiales de presentar un momento de dipolo eléctrico cuando se les deforma. Este efecto es reversible.
- Pirómetro de infrarrojos. Capta la radiación espectral del infrarrojo, invisible al ojo humano, y puede medir temperaturas menores de  $700^{\circ}\text{C}$ , abarcando desde valores inferiores a  $0^{\circ}\text{C}$  hasta más de  $2.000^{\circ}\text{C}$ .
- PLC (Controlador Lógico Programable). Ordenador de control y monitorización industrial de aplicación en las operaciones de seguridad, secuenciales y lógicas donde las acciones de control están basadas en equipos y alarmas.
- Potenciómetro. Divisor de tensión ajustable formado por un reóstato de tres terminales, uno de ellos móvil. Instrumento que mide una fuerza electromotriz desconocida mediante su compensación contra una diferencia de potencial conocida producida en un circuito por corrientes conocidas.
- Precisión. Grado de dispersión del resultado de la medida cuando esta se repite un número determinado de veces bajo condiciones especificadas. En otras palabras,

- es la cualidad de un instrumento por la que tiende a dar lecturas muy próximas unas a otras.
- A señalar que el término precisión se asocia en ocasiones a la repetibilidad, resolución o exactitud, por lo que es preferible utilizar estos últimos términos y evitar el uso de precisión para evitar confusiones.
- Proceso o sistema controlado. Engloba las funciones realizadas por el equipo en el cual es controlada la variable, sin incluir los instrumentos de control.
- Proceso continuo. Proceso en el cual entran componentes y salen productos en caudales sin restringir y durante largos períodos de tiempo.
- Proceso discontinuo. Proceso que se lleva a cabo con una cantidad dada de material dentro de un reactor sin que se cargue material adicional durante la operación.
- Proceso de calibración. Conjunto de operaciones que establecen, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores indicados por un instrumento y el correspondiente valor del mensurando, materializado en un patrón utilizado como referencia.
- PROFIBUS. Red de comunicaciones abierta, muy popular en Europa, estándar e independiente de fabricantes (interoperable). Dispone de tres perfiles de usuario: PROFIBUS FMS, PROFIBUS DP y PROFIBUS PA (automatización de procesos incluso en áreas con riesgo de explosión, comunicación con equipos de campo).
- Programador. Instrumento que ajusta su propio punto de consigna o bien el punto de consigna de otro instrumento controlador de acuerdo con un programa prefijado.
- Puente. Término empleado para designar la configuración eléctrica general de ciertos elementos transductores. Es también una abreviación de puente de Wheatstone.
- Puerto (*Port*). Conexión de comunicaciones de un ordenador o de un aparato electrónico con base un microprocesador.
- Punto de consigna (*Set Point*). Variable de entrada en el controlador que fija el valor deseado de la variable controlada. Puede fijarse manual o automáticamente, o bien programarse.
- Radiación. Emisión y propagación de energía en forma de ondas a través del espacio o a través de un material.
- Realimentación. Parte de la señal de salida de un sistema que vuelve a la entrada.
- Receptor. Recibe la señal procedente del transmisor y la indica o registra.
- Repetibilidad. Grado de concordancia entre los resultados de mediciones del instrumento al medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación recorriendo todo el campo. Viene expresada en tanto por ciento del alcance. Ejemplo:  $\pm 0,1\%$  de 150 =  $\pm 0,15$  °C (campo 50 a 100 °C).
- Resistividad. Resistencia de un material expresada en ohmios por unidad de longitud y de sección.
- Resolución. Magnitud de los cambios en escalón de la señal de salida al ir variando continuamente la medida en todo el campo. Viene expresada en tanto por

ciento de la salida de toda la escala. Grado en que pueden discriminarse valores aproximadamente iguales de una cantidad.

Variación más pequeña en la señal de entrada que produce un cambio detectable en la señal de salida.

Puede expresarse en bits, en porcentaje, en porcentaje de la lectura o en porcentaje de toda la escala.

Ejemplo: un sistema de 12 bits tiene una resolución de una parte en 4.096 o 0,0244% de toda la escala.

Resolución infinita. Capacidad de proporcionar una señal de salida progresiva y continua en todo el campo de trabajo del instrumento.

Robustez. Tolerancia o insensibilidad del controlador ante los cambios o perturbaciones que puedan presentarse en el proceso.

Ruido. Cualquier perturbación eléctrica o señal accidental no deseadas que modifica la transmisión, indicación o registro de los datos deseados.

Sensibilidad. Incremento mínimo de una variable al que responde el instrumento. Razón entre la variación de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona después de haberse alcanzado el estado de reposo. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida. Ejemplo: 0,05% de 200 = 0,10 °C (campo 100-300°C).

Sensor. Elemento o aparato que detecta una variable recibiendo información de la misma en forma de una cantidad y la convierte en información de la misma cantidad o de otra diferente.

Señal. Salida o información que emana de un instrumento. Información representativa de un valor cuantificado.

Señal de salida. Señal producida por un instrumento que es función de la variable medida.

Señal de salida analógica. Señal de salida del instrumento que es una función continua de la variable medida.

Señal de salida digital. Señal de salida del instrumento que representa la magnitud de la variable medida en forma de una serie de cantidades discretas codificadas en un sistema de notación. Se distingue de la señal de salida analógica.

SIL (Safety Integrity Level). Especifica el Nivel de Integridad de la Seguridad que define, en función del posible impacto de un fallo sobre personas y bienes y su probabilidad, el nivel de seguridad requerido del sistema y, por tanto, de todos sus componentes.

Sistemas de seguridad. Diseñados para que el tiempo de tolerancia a fallo del proceso o tiempo de seguridad del proceso (PST = Process Safety Time) no sea superado, cuando un fallo ocurre en el proceso o en el sistema de seguridad.

Span (Alcance). Diferencia algebraica entre los valores extremos del campo de medida (*range*).

Supresión de cero. Cantidad con que el valor inferior del campo supera el valor cero de la variable. Ejemplo: en el campo 10 a 100 l/h es 10 l/h, o bien  $(10/90) \times 100 = 11,1\%$ .

Tacómetro. Instrumento que mide la velocidad de rotación de un eje.

Temperatura ambiente. Temperatura que prevalece en un ambiente dado.

Temperatura de almacenamiento. Temperatura o intervalo de temperaturas en las que puede almacenarse el instrumento.

Temperatura de servicio. Campo de temperaturas en el cual se espera trabaje el instrumento dentro de límites de error especificados.

Termistor. Resistencia cuyo valor varía con la temperatura en una forma definida deseada.

Termopar. Par de conductores de materiales distintos unidos entre sí que generan una fuerza electromotriz cuando las dos uniones están a distintas temperaturas.

Termopila. Grupo de termopares conectados en serie y utilizados para medir la potencia de radiaciones.

Termorresistencia. Hilo de material cuya resistencia varía con la temperatura, generalmente en forma lineal.

Tiempo de acción derivada. Equivale al tiempo en minutos con que la acción derivada se anticipa al efecto de la acción proporcional en el elemento final de control.

Tiempo de acción integral. Equivale a minutos por repetición de la acción proporcional. También se acostumbra a expresar en el recíproco, repeticiones por minuto.

Tiempo muerto. Retraso definido entre dos acontecimientos relacionados entre sí.

Tolerancia. Desviación permitida con relación a un valor especificado. Puede expresarse en las unidades de la medida, en el porcentaje del intervalo de medida o en el porcentaje de la lectura.

Tolerancia al fallo. Tiempo máximo disponible para que un sistema de seguridad actúe eliminando los fallos encontrados en el proceso sin afectar su funcionamiento. Usa los circuitos:

- 1oo1 de canal simple. Un fallo se traduce en la pérdida de la función de seguridad y en la parada forzosa del proceso. Si dispone de diagnóstico automático de fallos se designa 1oo1D.
- 1oo2 . Si un canal falla el otro realiza la función de seguridad. Sin embargo, la probabilidad de fallo falso se duplica.
- 2oo2. Se reduce la probabilidad del fallo falso pero se duplica la probabilidad de fallo a la demanda.
- 2oo3. Existen tres canales de los que dos funcionan bien para realizar las funciones de seguridad, por lo que son tolerantes a un fallo.
- 1oo2D . Excelente con respecto a la seguridad pero no es tolerante a fallos respecto a la disponibilidad. En la 1oo2D un fallo único detectado no conlleva la pérdida de la seguridad o la parada del proceso, puesto que, aislado el canal afectado, el canal sano continuará la operación.

- 2oo4D. Es tolerante a dos fallos para la integridad de la seguridad y a un fallo respecto a la disponibilidad del sistema.
- Transductor. Recibe una señal de entrada función de una o más cantidades físicas y la convierte modificada o no a una señal de salida.
- Transmisor. Capta la variable de proceso a través del elemento primario y la convierte a una señal de transmisión estándar.
- Transmisor inteligente. Transmisor que tiene incorporadas funciones adicionales tales como compensación de no linealidades del sensor, calibración innecesaria al tener grabados 126 puntos o más, cambio fácil del campo de medida mediante un intercomunicador.
- Transmisor multivariable. Dispone de varios sensores que permiten aplicar criterios varios de compensación de variables. Por ejemplo:
  - Un transmisor de caudal de gas con sensores de presión y temperatura que mide el caudal masa.
  - Un transmisor de temperatura con sensores de temperaturas normal, mínima, máxima, mediana o media que permite que la temperatura seleccionada sea la primera buena medida de la variable o bien admite la aplicación de otro criterio, y en caso de que falle el sensor 1 transfiere la lectura al sensor 2 y además comunica el fallo al ordenador central.
- Trazabilidad. Propiedad del resultado de las mediciones efectuadas con un instrumento o con un patrón, consistente en poder referirla a patrones nacionales o internacionales, a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones, todas ellas con incertidumbres determinadas en cada comparación. Cada paso en la cadena debe documentarse en un informe de calibración o de ensayo.
- Tubo Bourdon. Tubo manométrico curvado de metal elástico que se deforma al aplicar presión en su interior.
- Tubo Pitot. Tubo cilíndrico, con un extremo abierto dirigido contra el fluido aguas arriba, que mide la presión de impacto.
- TÜV (Technischer Überwachungs Verein Rheinland e.V). Agencia independiente que certifica los sistemas de seguridad.
- Unión de medida. La unión de medida de un termopar es la unión que está a la temperatura que desea medirse.
- Unión de referencia. La unión de referencia de un termopar es la unión que está a la temperatura conocida o de referencia.
- Valor nominal. Valor aproximado redondeado de la medida de un material o de la característica de un instrumento de medida.
- Variable aleatoria. Variable que puede adoptar cualquier valor de un determinado conjunto de valores y que está asociada a una distribución de probabilidad.
- Variable controlada. Dentro del bucle de control es la variable que se capta a través del transmisor y que origina una señal de realimentación.

Variable manipulada. Cantidad o condición del proceso variada por el elemento o elementos finales de control.

Variable medida. Cantidad, propiedad o condición física que es medible.

Vida útil de servicio. Tiempo mínimo especificado durante el cual se aplican las características de servicio continuo o intermitente del instrumento sin que se presenten cambios en su comportamiento más allá de tolerancias especificadas.

Viscosidad. Resistencia a la deformación de un fluido bajo un esfuerzo de. cortadura.

Zona muerta (*dead band*). Campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida. Ejemplo:  $\pm 0,1\%$  de 90 =  $\pm 0,09$  l/h (campo 10 a 100 l/h).

## A.8 Referencias

### General

Shinsky, F.G. Process Control Systems, McGraw-Hill, NY, 1988.

-

Considine, Douglas M. Process/Industrial Instruments and Controls Handbook, / McGraw-Hill, 1999.

-

Liptak, Béla G. Instrument Engineer's Handbook, , Chilton Book Company, 2003.

-

Marszal, E. M. and E. W. Scharpf. Safety Integrity Level selection, , ISA, 2002.

Creus, Antonio. Simulación y Control de Procesos por Ordenador, Marcombo, S. A., 2007.

Manual de Instrumentación para la industria del gas, Sedigas, 1994.

Creus, A. Instrumentos industriales - Su ajuste y calibración, , Marcombo, S. A. 2ª ed., 1997.

-

Flow Measurement (2nd Ed.), D.W. Spitzer (Ed.), ISA, 2001.

Journal Industrial Automation and Control, Honeywell.

Instrumentación: mercado, estado del arte y tendencia, Oilgas, marzo 2002.

- Fischer-Rosemount. Catálogos, -, 2003.

OMRON. Catálogo general, - 2003.

Honeywell. Catálogos, -2007.

ABB Automation Group. Catálogos, 2007.

- ISA. INTECH (The Instrumentation, Systems and Automation Society).

ISA. Conferencias y artículos, Sección Española (Sociedad Internacional de Medición y Control).

Wikipedia. Información general.

GLOBALSPEC. Información general, – The Engineering Search Engine.

### **Transmisores**

Berge, J. Fieldbuses for Process Control [Hart, Foundation Fieldbus, y Profibus-PA, ISA, 2002.

Fieldbus wiring design and installation Guide, Relcom Inc., 2002.

Fieldbus function Blocks, Instruction Manual, Smart, 2002.

Foundation Fieldbus. Fieldbus Tutorial - A Foundation Fieldbus Technology Overview, 2002.

Fondation Fieldbus. Fieldbus Glossary, –2002.

ANSI/ISA-50.02 Fieldbus Standard for Use in Industrial Control Systems.

Honeywell XYR 5000™ Wireless Transmitters.

Honeywell. Transmisor de Temperatura Inteligente STT 3000.

Thermocouple & RTD. Temperature - Modbus or Laurel ASCII Protocol Serial I/O Transmitter – Laurel Electronics.

“Implementation of On-Line Monitoring to Increase the Calibration Interval of Pressure Transmitters”, September, 2004, in Halden, H.M. Hashemian, - Analysis and Measurement Services Corporation.

### **Presión**

Pressure • Load • Torque • Acceleration • Displacement • Instrumentation – Honeywell Frequently Asked Questions, 2003.

### **Caudal**

- Turbine flowmeters – Hedland – Racine Flow Meter Group, 2007.

Brooks Technical Bulletin 6311-T-001: Guide to Brooksmeter application.

Brooks Specification: Electromagnetic Flowmeter, DSE 7100-71200-71300.

Spink, L. K. Principles and Practice of Flow Meter Engineering, , The Foxboro Company. 9th edition 1967

Cusick, C. F. Flow Meter Engineering Handbook, , Honeywell.

Danen, G. W. A. Shell Flow-Meter Engineering Handbook, 2nd. Edition,, McGraw-Hill Book Company, 1985.

Applying vortex shedding flowmeters - Tom Kuperij, WIB -- Control Engineering Europe, 5/1/2000

SEDIGAS. Manual de medición de grandes caudales, 1991.

- Rosemount 8712D Magnetic Flowmeter Transmitter

Dorado, Alberto. “Medida de caudal másico por efecto Coriolis”, , Automática e Instrumentación, nº 193, julio 1989.

- Annubar ® Primary Element Flow Calculations – Rosemount.

Norma Internacional ISO-5167-1980. Mesure de debit des fluides au moyen de diaphragmes, tuyeres et tubes de Venturi insérés dans de conduites en charge de section circulaire.

ISO 5167-4:2003 - Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits.

- Liquid Flowmeters OMEGA 2007 (omega.com)

- Racine Vortex Flow Meters – Catalogue 2007

### Nivel

- Hendrick, W. L. Industrial Applications of Radar Technology for Continuous Level Measurement, , Instrument Society of America, 1992.

- OMEGA Complete Flow and Level Measurement Handbook and Encyclopedia®, OMEGA Press, 1995.

Brumbi, Detlef. Fundamentals of Radar Techniques for Level Gauging, , Krohne Metechnik GmbH & Co. KG, 1995.

Parker, Sarah. Measuring level: A guide for CPI users, , Fisher Rosemount, Chemical Engineering, May 1995.

Reher, Oliver. “Aplicación de transmisores por microondas”, , Endress + Hauser España, Automática e Instrumentación, No. 262, marzo 1996.

RF Level Measurement Handbook, Princo Instruments, Inc., 1999.

“Advanced Electronics Overcome Measurement Barriers”, Control, (covering the capacitance method of measuring level), February 1999.

DR3000 Gauging Radar Transmitter - Ametek Drexelbrook, 2001.

Emerson. Hydrostatic Tank Gauging System, Reference Manual.

Rosemount 5600 Series Radar Level Transmitter- Emerson Process Management – Rosemount Division.

### Temperatura

Creus, A. Pujol, M. V “Pirometría” ,; Novatecnia, número extraordinario, diciembre 1972, Asociación Nacional Ingenieros Industriales, Agrupación de Cataluña.

Claggett, T. J. y R. W Worrall. “Temperature measurement and sensor selection”, , Instrumentation Magazine, vol. 20, No. 4, Honeywell.

Pallás Areny, Ramón. “Informe - Medidas de temperatura”, , Automática e Instrumentación, noviembre 1985.

“Land Radiation Pyrometers”, boletín L.R.P. 67.

Thermocouples and resistance thermometers, catálogo Honeywell.

C. W. Briggs. “Infrared sensors for glass temperature measurements”, , Instrumentation Magazine, Honeywell.

Norma Internacional IEC-584-1982 e IEC-751-1983 sobre termopares y sondas de resistencia.

Failure Modes, Effects and Diagnostic Analysis - STT250 temperature transmitter - Honeywell International Inc., USA.

- Practical Thermocouple Temperature Measurements – Dataforth Corporation, 2007

Barber - Colman Company. Identifying and Correcting Temperature Control Problems, , Loves Park, IL., 2000.

DTI050 - Digital Temperature Indicador AMETEK 2007

- Required Signal Conditioning for Thermocouples, ational Instruments, 2007.

RTD Temperature Measurement, National Instruments, 2007.

PRT-450 Smart Thermometers, ELE-LOGIC Instruments.

Taking Thermocouple Temperature Measurements, Nacional Instruments, 2007.

Tableaux des tensions thermoélectriques pour tous les types de thermocouples, Nacional Instruments, Nov. 2006.

#### **Otras variables**

–

Process pH Catalog, bulletin 4111, Beckman.

Industrial pHinstruments, catalog, The Bristol Company.

Catalog 30-r: Process electrolytic conductivity equipment, Beckman.

Bulletin PIB-4: Measurement and control of pH and Conductivity, Honeywell.

9782 pH/ORP analizador controlador multifunction, Honeywell.

4114 Dew Point Transmitter, Honeywell.

Smart Sensors and Analytical Instruments, Honeywell, December 2004.

Beckman: Continuous Infrared Analyzers, bulletin IR-4055-C.

Hesketh, Howard E. "Select the right pH Measurement System", , Chemical Engineering Progress, October 1995.

Nucleonic density measurements - 2002 ABLE Instruments & Controls Limited.

Analyze IT - Single and Dual Input Analyzers for High Level Conductivity – ABB.

#### **Elementos finales de control**

Baumann, H. D. Control Valve Primer (3rd Ed.), , ISA, 1998.

Flow Equations for Sizing Control Valves - ANSI/ISA-75.01.01-2002.

- Control Valve Terminology - ANSI/ISA-75.05.01-2000.

GBV-18: Pneumatic Valve Positioner HP, especificación Honeywell.

- Manual de Cálculo de Válvulas de Control - Masoneilan

Boger, H. W. y Lucien Mazot. Why valves are always oversized, , Masoneilan, Intech, Vol. 40, n° 10, October 1993.

Kaseda, Chosei, et al. Online Control Valve Diagnostics, - Yamatake Corporation, 2000.

ANSI/ISA-75.01-1985 Flow Equations for Sizing Control Valves.

Válvulas de solenoide ASCO

FIELDVUE Digital Valve Controllers, Fisher-Rosemount.

Posicionador Fieldbus de Válvulas de Control – Dresser – Masoneilan.

“Rethink your control valve maintenance”, Chemical Processing, 2004–2007.

Control Valve Handbook, Third edition, Fisher Controls International, Inc.

Curb your valve cost, PlantServices.com, 2007.

Data Acquisition Processor Helps Provide In-Place Diagnosis of Control Valves, Microstar Laboratorios, 2007.

“Enhanced reliability for final elements” - SA Instrumentation & Control - May 2006.

Control Valve Maintenance Support System – Valstaff Application for HART System Model VMS102 – 2004.

Boger, Henry W. Smart Valves – Flow Conditioning Technology, Masoneilan.

### **Controladores**

Creus, Antonio. Control de procesos industriales - Criterios de implantación, , Colección Productiva, 1988, Marcombo Boixareu

Serra, Ignacio; César de la Prada y Pastora Vega. “Control de procesos no lineales: aplicación al caso de pH”, , Automática e Instrumentación, No. 206, octubre 1990.

ABB Catálogo de instrumentos industriales 2007.

Visual Batch Software – Emerson’s Intellution Division, 2007

Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (2002) – RD 842/2002.

Plant Scape - Control integrado, Honeywell – 2006.

Process Instrument Explorer, Honeywell, 5-2004.

SCT 3000 Smartline Configuration Toolkit, Honeywell, 2006.

“Control multivariable”, Control Engineering, 2002.

DC1000 Series General Purpose Universal Digital Controllers, Honeywell.

- Intelligent Tuner, Fisher-Rosemount-Emerson, 2002.

IEC 61511 Safety Instrumented Systems Overview & Current Status, Simon Brown Control & Instrumentation Systems, 13/11/ 2002.

- Ziegler-Nichols Tuning Rules And Limitations - John Gerry – Expertune, 2003.

Kinney, Tom and John Gerry, P.E. Which Tuning Method Should You Use?, Sep. 16, 2004.

VanDoren, Vance J. “Loop Tuning Fundamentals”, , Control Engineering, July 1, 2003.

Tuning a PID (Three-Mode) Controller, Newport Electronics Inc., 2003.

Programas de sintonización de controladores al proceso

BESTune from BESTune.Com (<http://www.bestune.isclever.com/>)

Control Arts PID Tuning Software from Control Arts, Inc. (<http://www.controlartsinc.com/>)

Control Loop Assistant from Lambda Controls (<http://www.lambdacontrols.com/>)

Control Station from Control Station Technologies (<http://www.controlstation.com/>)

EnTech Tuner Module from the EnTech division of Emerson Process Management (<http://www.entechcontrol.com/>)

ExperTune\* from ExperTune, Inc. (<http://www.expertune.com/>)

INTUNE\* from ControlSoft, Inc. (<http://www.controlsoftinc.com/>)

pidtune from EngineSoft (<http://www.pidtune.com/>)

Pitops from the Process Control business of Artcon Inc. <http://www.picontrolsolutions.com/>

Protuner from Techmation (<http://www.protuner.com/>)

TOPAS from ACT, GmbH (<http://www.act-control.com/>)

Tune-Plus from Innovention Industries, Inc. (<http://www.innovin.com/>)

TuneWizard from Plant Automation Services, Inc. (<http://www.tunewizard.com/>)

#### Mantenimiento de instrumentos

Interest grows in SIL concept; instrument manufacturers to certify products, Control Engineering Europe, September 1, 2001.

“Predictive maintenance prevents failures from happening at a bad time and fixes them before they cause damage”, National Instruments, July 2007.

Control your maintenance, ChemicalProcessing.com, July 2007.

CMMS: Integrating Real-Time Information for Condition-Based Maintenance, Freiter Gord, Maintenance World, 2005.

Maintenance and Calibration of Measuring and Test Instruments: and Investment in Safety and Quality – Gossen Metrawatt.

Maintaining Process Control Field Devices, Maintenance Technology, October 2004.

Wallace, Thomas. Asset Management Solutions, Fisher-Rosemount Systems, Inc.

Safety integrity level – SA Instrumentation, June 2006.

#### Calibración de los instrumentos

Maroto, Alicia et al. Estrategias para el cálculo de la incertidumbre, Dpto. de Química Analítica y Química Orgánica, Instituto de Estudios Avanzados, Universitat Rovira i Virgili, 2002.

Traceability & Uncertainty of Measurement Laboratory Accreditation Bureau, 2005.

Calibraciones en laboratorio permanente y in situ, Laboratorio de Metrología y Calibración de Presión y Temperatura Termocal, 2007.

Dieck, R.H. Measurement Uncertainty (3rd Ed.), ISA, 2002.

Husain, Rahat et al. Uncertainty Calculations in a Measurement Standards Laboratory, , Research Institute King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia, 999.

Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en la medición de presión con Manómetros, CENAM, México, junio 2004.

Recktenwald, Gerald. Uncertainty Estimation and Calculation, - Portland State University, Department of Mechanical Engineering, mayo 2006.

Prioritising Uncertainty Reduction Efforts - Verifiers' Perspectiva - Steve Ross DNV – 19/01/2007

.- Evaluating uncertainty components: Type A y B - NIST

- Expanded uncertainty and coverage factor - NIST

- Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results - Barry N. Taylor and Chris E. Kuyatt - NIST Technical Note 1297 - 1994

- QUANTUM low-flow Coriolis mass flow instruments - Brooks Instrument calibration laboratory december 2006

- Fluke 74X Series Documenting Process Calibrator - Calibration Manual - 2006

- Tolerance Calculator 4.0, Fluke MET/CAL® Plus Versión 7.0, MET/CAL® V7.1 mejorado, Fluke MET/CAL® Plus Versión 7.2,

- Fluke 740 Multifunction Calibrators - 2007

- Fluke 712 RTD Calibrator 2007

- Transmitter Calibration with the Fluke 700 Series Documenting Process Calibrator

- PPC3 - Pressure Controller/Calibrator – DH Instruments – FLUKE - 2007

- Calibrate current-to-pressure transducers (I/P), valve positioners, and control valves – ISA - Intech 1- april 2005

- Catálogos Beamex de calibradores de presión, temperatura y software de calibración - 1999

- Introducing the world's first fieldbus calibrator 01 • 2007 WORLD - Beamex corporate magazine

- Experimentation and Measurement - W. J. Youden reprinted may 1997 - NIST

- EURACHEM / CITAC Guide CG 4 - Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement – QUAM 2000

- Is there a the difference between 'accuracy' and 'uncertainty'? NPL (Nacional Physical Laboratory) 2007

- 9000 Series Hydraulic Deadweight Testers – HOTEK Technologies 2007

- PC6 Pressure Calibrator - HOTEK Technologies 2007

- Dead Weight Tester RAVIKA 2007
- WIKA CPB 5000 Medidor de peso muerto julio 2007
- GR Ruska 2485 Medidor peso muerto
- Eurotron PGS Series - Hand-held pressure generation system - 2006
- Ashcroft Model 1084 Pocket Test Gauge - 2007
- JOFRA signal calibrators AMETEK 2007
- JOFRA DPC-500 Calibrador de presión AMETEK - 2007
- JOFRACAL Temperature Calibration Software – AMETEK 2007
- JOFRA ATC series dry-block and liquid bath calibrators - AMETEK
- AMETEK – Manuales y hojas de calibración 2007.
- LANDCAL Blackbody Temperature Calibration Sources – Land Instruments Internacional – 2007
- Land Radiation Thermometers 2005
- American Sensor Technologies Introduces New, Loop-Powered Digital Pressure Gauge may 2007
- Procesos de calibración P-002 para Manómetros tipo Bourdon, Ovredal, noviembre 1992.
- Guide to the expression of uncertainty in measurement. ISO 95.
- Norma ISO 9002/UNE 66-902/EN 29002.
- ISO 9000 putting the quality process to work, John Forrest, ABS Consulting Services, Chemical Engineering, septiembre 1995.
- Metrology, standardization and conformity assessment – ISO 2006
- Guide for the Expression of the Uncertainty of Measurement – GUM
- Standards for the measurement of pressure, P. R. Stuart, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, Measurement and Control, vol. 20, octubre 1987.
- Techne UCAL 400+ Dry Block Temperature Calibrator
- Tek Know TC2000 Dry & Liquid Calibration Bath
- ST 3000 FF Transmitter With FOUNDATION\_ Fieldbus Option Installation & Device Reference Guide - 34-ST-25-15 - Honeywell - 8/04
- ST 3000 Smart Transmitter Release 300 with HART® Communications Option -User Manual - Doc. No.: 34-ST-25-17 Honeywell - Revision Date: 4/07
- MASONEILAN ValVue® SOFTWARE INTERFACE TO SVI® - INSTRUCTION MANUAL EW 1000 04/99
- Rosemount 3095 MultiVariable™ Mass Flow Transmitter with HART® or FOUNDATION™ Fieldbus Protocol - 00809-0100-4716, Rev HA - May 2005
- Model 1151 Smart Pressure Transmitters, Rosemount, 1999.
- Rosemount 3144P Temperature Transmitter – Rosemount Reference Manual 00809-0100-4021, Rev DA November 2004

- Rosemount 648 Wireless Temperature Transmitter - Reference Manual 00809-0100-4648, Rev AA - January 2007
- DigiGauge Digital Pressure Gauge - Instruction Manual - Rothoterm
- HART® Transmitter Calibration - Engineer's Notebook –Transcat 2007
- Calibration of Temperature Sensors. A vital but often misunderstood procedure within the food industry - N.E.M Business Solutions - 2004
- Thermocouple Generation Tables, Minco Products Inc., 2005.
- PTE-1 Hand Held Calibrator Operating Manual – HEISE - REVISION 4.4 3/2002
- Technical Guide 13 - Pressure Gauge Calibration – MSL – Measurement Standards Laboratory
- Pressure Measurement and Calibration TH2 – Armfield 2007
- The Subject Is Calibration 1.01 ±0.002% of Range - Tom Lecklider, Technical Editor EE Evaluation Engineering
- Instructions for Calibration and Adjustment of your Thermoprobe Thermometer – ICL Calibration Laboratorios Inc
- Series 6000 Digital Pressure Gage, especificación RUS 60008-91-5000 RUSKA.
- Norma ISO 9000:2000
- Norma ISO/IEC 17025:1999 de calibraciones de laboratorio.
- Norma ISO 31-0:1992 Procedimiento de redondeo de la incertidumbre.
- Institutos Tecnológicos de Normalización:  
ENAC- Entidad Nacional de Acreditación  
NIST -Nacional Institute for Standard and Technology
- Organismos de Acreditación:  
Internacionales: ISO, CEN (Normalización), etc.  
España: AENOR y ENAC(Entidad Nacional de Acreditación)  
Francia: COFRAC  
Portugal: IPQ  
Alemania: DAR  
Italia: SINAL  
Reino Unido: UKAS
- A nivel Europeo: ISO, CEN (Comité Europeo de Normalización), etc.
- Documentos de Incertidumbre de Medida en Calibración:  
WECC doc. nº 19 (1990)  
EAL-R2 "Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration" Edition 1 April 1997.  
EA - 4/02(2000)
- Programas de cálculo de incertidumbres:

ProCalV5 Test Type Packages,  
 SPC Software, Integrated Sciences Group, Hewlett Packard Corporate Metrology,  
 Uncertainty Calculator 3.2 (ISO 'Guide to the Expression of Uncertainty in  
 Measurement ', 1993, NIST Technical Note 1297, etc.),

### Estándares

- ISA - Standards Numerical Index- 2002
- Norma ISA-S 5.2-1976 Binary Logic Diagrams for Process Operations.
- Norma ISA-S5.3-1983 Graphic Symbols for Distributed. Control/Shared Display Instrumentation, Logic and Computer Systems.
- Norma ISA-S 5.1-1984 (R 1992) Instrumentation Symbols and Identification
- Norma ISA-S5.5-1985 Graphic Symbols for Process Displays
- Norma ISA-S5.4-1991 Instrument Loop Diagrams
- ANSI/ISA-S51.1-1979 (R 1993) (26 de mayo de 1995) Código de los instrumentos.
- DIN 19227 Parte 1 de códigos de identificación de instrumentos y controles
- DIN 19227 Parte 2 de símbolos gráficos.
- ISO 3511 Industrial process measurement control functions and instrumentation - Symbolic representation, partes 1 (año 77), 2 (año 84), 3 (año 84) y 4 (año 85)
- ISO 14617 Graphical symbols for diagrams del año 2002
- Normes AFNOR E 04 202 de juin 76 (Dessins techniques - Symboles graphiques de genie chimique) .
- ISO 14617 Graphical symbols for diagrams
- ANSI/ISA-12.00.01-2002 - Electrical Apparatus for Use in Class i, Zone 0, 1, & 2 Hazardous (classified) Locations
- ANSI/ISA-51.1-1979 (R1993) - Process Instrumentation Terminology
- ANSI/ISA-75.11.01-1985 (R2002) - Inherent Flow Characteristics and Rangeability of Control Valves
- ANSI/ISA-84.01-1996 - Application of Safety Instrumented Systems for the Process Industry
- ISA-MC96.1-1982 - Temperature Measurement and Thermocouples
- PTC19.1-85 - Measurement Uncertainty – Instruments and Apparatus (ANSI)
- PTC19.2-87 - Pressure Measuring Instruments and Apparatus (ANSI)
- PTC19.3-74 - Temperature Measuring Instruments and Apparatus (ANSI)
- PTC19.22-86 - Digital Systems - Techniques, Instruments and Apparatus (ANSI)
- Documentos de cálculo de incertidumbre. WECC n° 19 (1990), EAL – R2 (1997), EA – 4/02 (2000).
- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO, Ginebra, 1993.
- ANSI/ISA-75.01.01-2002 (60534-2-1 Mod) - Flow Equations for Sizing Control Valves.

ANSI/ISA-75.05.01-2000 (R2005) - Control Valve Terminology.

ANSI/ISA-75.11.01-1985 (R2002) - Inherent Flow Characteristic and Rangeability of Control Valves.

ISA-75.13-1996 - Method of Evaluating the Performance of Positioners with Analog Input Signals and Pneumatic Output.

ANSI/ISA-75.26.01-2006 - Control Valve Diagnostic Data Acquisition and Reporting.