

Instrumentación de Procesos

Guía práctica para medición de variables industriales

Jaime J. Rodríguez Núñez



libro digital



UNIVERSIDAD
DE LA COSTA
1970

VIGILADA MINEDUCACIÓN

Rodriguez Núñez, Jaime John

Instrumentación de procesos / Jaime Jhon Rodriguez Núñez. – Barranquilla:
Corporación Universidad de la Costa, 2021

ISBN: 978-958-5172-11-1 (digital)

ISBN: 978-958-8710-64-8 (impreso)

Instrumento de medición

Medición

Pesas y medidas

681.2 R696

Esta obra es propiedad intelectual de sus autores y los derechos de publicación han sido legalmente transferidos al editor. Queda prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin permiso por escrito del propietario de los derechos del *copyright*®.

Instrumentación de Procesos

Guía práctica para medición de variables industriales

Jaime J. Rodríguez Núñez





Instrumentación de Procesos

Autor:
Jaime J. Rodríguez Núñez

Primera edición digital, 2021[©]
Primera edición impresa, 2010[©]

ISBN: 978-958-5172-11-1 (digital)
ISBN: 978-958-8710-64-8 (impreso)

Corporación Universidad de la Costa, CUC
Barranquilla - Colombia

Editorial Universitaria de la Costa S.A.S.
Calle 58 No. 55-66
Teléfono: (575) 344 4623
educosta@cuc.edu.co

Lauren J. Castro Bolaño
Directora (2021)

Perla Isabel Blanco Miranda
Coordinación Editorial (2010)

Impreso por:
Artes Gráficas Industriales Ltda.
Barranquilla, Colombia

**A este libro se le aplicó
Patente de Invención No. 29069**

Hecho el depósito que exige la ley

©Todos los derechos reservados, 2021

CONSEJO DE FUNDADORES
CORPORACIÓN UNIVERSITARIA DE LA COSTA, CUC

EDUARDO CRISSIEN SAMPER
RUBÉN MAURY PERTUZ (q.e.p.d.)
NULVIA BORRERO HERRERA
MARÍA ARDILA DE MAURY
RAMIRO MORENO NORIEGA
RODRIGO NIEBLES DE LA CRUZ (q.e.p.d.)
MIGUEL ANTEQUERA STAND

PERSONAL DIRECTIVO
CORPORACIÓN UNIVERSITARIA DE LA COSTA, CUC

NULVIA BORRERO HERRERA
Rectora

RODOLFO MAURY ARDILA
Vicerrector de Bienestar

MARIO MAURY ARDILA
Director Departamento de Posgrados

HERNANDO ANTEQUERA
MANOTAS
Vicerrector Financiero

CAROLINA PADILLA VILLA
Secretaria General

ALFREDO GÓMEZ VILLANUEVA
Decano Facultad de Arquitectura

GLORIA CECILIA MORENO
GÓMEZ
Vicerrectora Académica

JAVIER MORENO JUVINAO
Decano Facultad de Ciencias
Económicas

HENRY MAURY ARDILA
Vicerrector de Investigaciones

ALFREDO PEÑA SALOM
Decano Facultad de Derecho (e)

JOSÉ EDUARDO
CRISSIEN ORELLANO
Vicerrector de Extensión (e)

MILDRED PUELLO SCARPATTI
Decana Facultad de Psicología

JAIME DÍAZ ARENAS
Vicerrector Administrativo

NADIA JUDITH OLAYA CORONADO
Decana Facultad de Ingeniería

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a mi familia, la fuente natural de motivación e inspiración para poder hacer realidad los grandes sueños.

A la Corporación Universitaria de la Costa, especialmente a los coordinadores de Ingeniería Electrónica por creer y hacer realidad este proyecto.

A mi institución, la Corporación Tecnológica Industrial Colombiana, que con la dirección de un grupo de visionarios, diseñaron en su tiempo dos carreras que son importantes para el desarrollo de un país como el nuestro: Instrumentación y Controles Industriales e Hidroneumática.

A aquellas personas que de manera silenciosa apoyaron este trabajo, lograron sacarlo del olvido, aportaron con su tiempo, con sus ideas críticas y con su motivación. Por ellos este proyecto hoy se convierte por fin en realidad... a ellos un fuerte abrazo y muchas gracias desde el fondo de mi corazón.

A los cientos de alumnos en la Corporación Universitaria de la Costa, Tecnológica Industrial Colombiana y la Universidad Tecnológica de Bolívar, que a pesar del tiempo aún siguen preguntando por la publicación de este libro.

A Luis A. Arévalo, quien despertó en mí el interés por la instrumentación de campo, cuando apenas comenzaba mi vida laboral en Colmáquinas Bogotá en 1988.



CONTENIDO

Prólogo	13
Introducción	15
Capítulo 1. Fundamentos de instrumentación y control	19
1.1. Conceptos básicos de control	20
1.2. Elementos de un lazo de control.....	23
Bibliografía	28
Capítulo 2. Definición de términos	31
2.1. Definición de términos	32
Bibliografía	43
Capítulo 3. Simbología	45
3.1. P&ID (Piping and Instrumentation Diagram).....	46
3.2. Hoja de especificación de instrumentos (Data Sheet).....	49
3.3. Simbología	51
Bibliografía	58
Capítulo 4. Medición de temperatura	59
4.1. Fundamentos	60
4.2. Escalas de temperatura	62
4.3. Formas de transferencia de calor	64
4.4. Resumen medidores de temperatura.....	67
4.5. Termómetros de vidrio.....	68
4.6. Termómetros bimetálicos.....	72
4.7. Termómetros de relleno térmico (bulbo-capilar).....	74
4.8. Termómetros de resistencia o RTD	79

4.9. Termocuplas o termopares	88
4.10. Termómetros de radiación	94
4.11. Resumen medidores de temperatura.....	99
4.12. Tablas de termocuplas y PT 100.....	100
Bibliografía.....	131
Capítulo 5. Medición de presión	133
5.1. Fundamentos de presión	134
5.2. Unidades y conversión	137
5.3. Manómetros de líquido	138
5.4. Manómetros mecánicos	144
5.5. Medidores de vacío	149
5.6. Transmisores neumáticos de presión	157
5.7. Transmisores electrónicos de presión	160
5.8. Transmisores inteligentes	166
5.9. Transmisores multivariable	168
Bibliografía.....	169
Capítulo 6. Medición de flujo.....	171
6.1. Definiciones.....	172
6.2. Influencia en el flujo de fluidos.....	174
6.3. Resumen medidores de flujo	178
6.4. Selección de un medidor de flujo	179
6.5. Medidores de flujo por presión diferencial.....	180
6.6. Rotámetro	189
6.7. Turbina.....	191
6.8. Desplazamiento positivo	193
6.9. Medidores ultrasónicos	198
6.10. Medidores magnéticos	202
6.11. Vortex.....	205
6.12. Medidor tipo Coriolis.....	207
6.13. Medidor dispersión térmica	210
6.14. Resumen medidores de flujo	212
Bibliografía.....	213

Capítulo 7. Medición de nivel	215
7.1. Formas de medición de nivel.....	216
7.2. Resumen medidores de nivel	218
7.3. Instrumentos para medición de nivel límite	219
7.4. Burbujeo.....	225
7.5. Presión hidrostática.....	227
7.6. Presión diferencial	229
7.7. Hidrostatic Tank Gauging	231
7.9. Ultrasonido.....	233
7.10. Microondas (radar).....	236
7.11. Radar de onda guiada	239
7.12. Láser	241
7.13. Capacitivo.....	243
7.14. Peso móvil	247
7.15. Pesaje.....	249
7.16. Radiación	251
Bibliografía	253
Capítulo 8. Elementos finales de control	255
8.1. Definición	256
8.2. Glosario de términos.....	257
8.3. Tipos de válvulas	261
8.4. Actuadores	268
8.5. Tipos de actuadores	270
Bibliografía	274



PRÓLOGO

Tuve mi primera experiencia de control de procesos automáticos por medio de dispositivos electrónicos, cuando apenas cursaba el décimo grado en un colegio técnico en Bogotá. Un ejercicio de clase de electrónica digital con una secuencia de control sencilla, me cuestionó cómo podía aplicar esos dispositivos que se veían frágiles, montados en *proto-board*, en algo que pudiera ser aplicado en el mundo real. Dos años después ya en la vida laboral, comencé a descubrir en un mundo que apenas asomaba, el panorama de las aplicaciones industriales hacia el año 1988. Esto despertó el interés de complementar mis estudios de electrónica, con mi carrera profesional en Instrumentación y Controles Industriales.

Han pasado más de 20 años desde mis primeras experiencias con la medición y control de procesos industriales, los cuales me han permitido recoger mucha información y por supuesto muchas experiencias, que por fortuna he podido compartir por medio de mi labor docente.

Este libro nació y creció sin darme cuenta. Al principio solo quería tener de forma ordenada y segura el material que preparaba para las clases. Poco a poco comenzó a crecer la información y era necesario disponer de ella en un archivo que además del texto, pudiera incluir dibujos y tablas que complementaran el material de clase. Con la ayuda de la tecnología, usando escáner y el *software* de diseño gráfico, se fue haciendo cada vez más fácil poder adicionar a mis archivos material complementario que sirviera para explicar de forma más clara y sencilla, cada uno de los conceptos.

Este libro contiene la experiencia docente de 14 años en las cátedras de Medición y Control de Variables Industriales. El principal objetivo es combinar los conceptos teóricos de la medición de variables industriales, con la experiencia de campo instalando, configurando, seleccionando y reparando instrumentos.

En los primeros capítulos encontrarán fundamentos de control, terminología, simbología de instrumentos y de equipos de proceso.

En los capítulos 4, 5, 6 y 7 se revisarán conceptos básicos y los métodos usados más frecuentemente en aplicaciones industriales, para medición de las variables principales como temperatura, presión, flujo y nivel.

En el capítulo 8 encontrarán conceptos básicos de válvulas de control.

El objetivo del libro es servir como material de consulta tanto a estudiantes de Instrumentación, Automatización de Procesos, Ingenierías Eléctrica, Electrónica, Mecatrónica y afines, personal de mantenimiento e ingenieros de proyectos.

Aunque he tratado de ser muy cuidadoso con los conceptos tratando de ser lo más universal posible, lo presentado en este texto no necesariamente es la verdad absoluta y en un momento determinado, puede haber otra interpretación, que puede ser aplicable a situaciones o condiciones de proceso en particular.

La idea inicial fue buscar los conceptos que pueden aplicarse a la mayoría de las situaciones de la industria.

Alguien decía que cuando uno escribe un libro nunca termina; un libro se abandona y estoy totalmente de acuerdo con este concepto. Por esa razón, en este nuevo intento quise dejar de ser tan crítico y terminar con la idea original que tenía, cerrando mis ojos y mis oídos a las novedades más recientes, porque cada vez que veía que llegaba algo novedoso en este campo, quería incluirlo y de esta forma sería imposible terminar.

Espero incluir estas novedades, conceptos más amplios en cada una de las variables y un capítulo de comunicaciones para instrumentación de campo, en la segunda edición de este libro.

Jaime J. Rodríguez
Barranquilla, noviembre de 2010

INTRODUCCIÓN

Las condiciones actuales de globalización de mercados han obligado a nuestras compañías a entrar en el proceso de automatizar sus plantas, para poder ser competitivos con productos provenientes de otras partes del mundo. La misión es ser eficiente o desaparecer, porque ya no solamente el precio es un indicador para la venta del producto. Se debe competir con buena calidad, optimización de las líneas de producción, seguridad en el proceso y tiempo de entrega. Para lograrlo se debe tener en cuenta el uso racional de la energía, eficiencia en la transformación de las materias primas y cumplir con la reglamentación cada vez más exigente en el manejo ambiental. Todas estas condiciones son imposibles o muy difíciles de conseguir sin disponer del control automático de procesos. Todas estas variables deben estar acompañadas con una adecuada estructura de tecnologías de información, para monitorear, controlar y optimizar el proceso, pero adicionalmente disponer de información confiable y en tiempo real en los diferentes niveles de la compañía, que permitan tomar decisiones en el momento adecuado.

La instrumentación y el control de procesos han evolucionado rápidamente de la misma forma como ha evolucionado la electrónica. Desde la aparición de los primeros transmisores neumáticos hacia los años 40, la instrumentación y los equipos de control de procesos, se han modernizado de forma paralela a la evolución de los dispositivos electrónicos. Pasando por transmisores basados en tubos electrónicos, luego con transistores y electrónica discreta, circuitos integrados, microprocesadores, y en los últimos años, la implementación de sistemas de supervisión y control basados en computador.

Los principios físicos en los que se basan las mediciones no han cambiado signi-

ficativamente en las variables principales, pero sí se han mejorado las técnicas de medición. Adicionalmente se ha logrado diseñar equipos robustos, que han permitido sacar del laboratorio algunas variables analíticas, con mediciones continuas directamente en campo. Variables tan complejas como densidad, viscosidad, cromatografía y espectrometría de gases, ya son una realidad en campo y se espera que en los próximos años se sigan implementando mejores sistemas de control y de adquisición de datos.

La estandarización también ha ayudado a difundir los nuevos sistemas de transmisión de datos de forma digital y los buses de campo están en pleno desarrollo y crecimiento. Es así como estamos evolucionado de los transmisores con salida de 4...20 mA y de los protocolos de comunicación como HART, a los instrumentos con salida totalmente digital como Profibus PA, Foundation Fieldbus y en algunos fabricantes ya aparecen aplicaciones de Industrial Ethernet a nivel de campo.

Como es de esperar, la tecnología seguirá aportando en el desarrollo de nuevos sistemas de comunicación especialmente con tecnología inalámbrica. Ese será el objeto de una nueva publicación, dedicada a tratar los temas de los sistemas de control avanzados y las comunicaciones usadas en procesos industriales.

Un profesional en instrumentación debe combinar diferentes técnicas en la proporción adecuada. Un instrumentista debe tener fundamentos en procesos industriales, conceptos básicos de química, física, electricidad, electrónica, mecánica, neumática, hidráulica y adicionalmente la experiencia en campo.

Desde mi punto de vista un buen instrumentista nace con una buena base teórica, pero se consolida en la medida que pueda acumular años de experiencia en aplicaciones de campo. Muchas veces al recibir los datos para selección de un equipo para alguna aplicación, se pueden tener en mente algunas opciones que en la teoría son viables, pero que en la visita a campo se descartan inmediatamente. En este caso la observación también juega un papel importante.

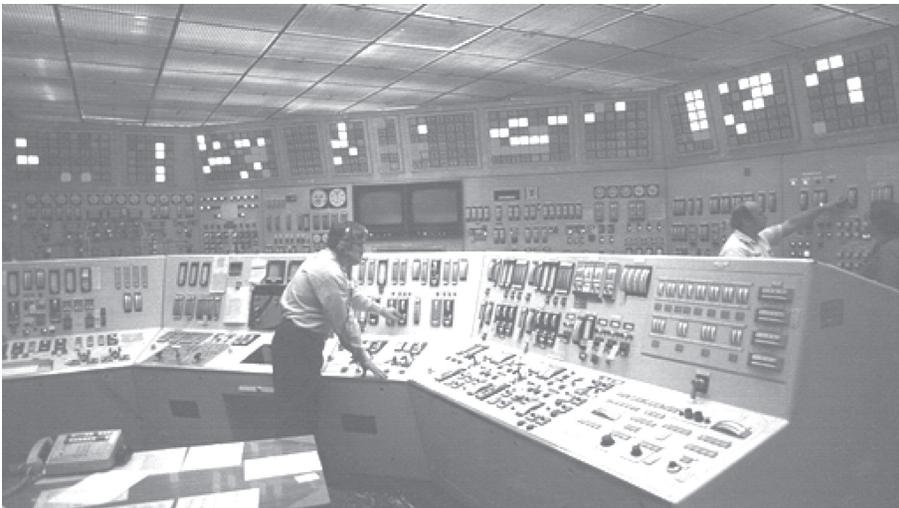
Al final un instrumentista es como un alquimista. Debe reunir los ingredientes adecuados, mezclarlos en la proporción y en el momento preciso, para obtener el resultado esperado. Al igual que los alquimistas, los profesionales de Instrumentación cada vez son más difíciles de conseguir. Desafortunadamente, las instituciones de educación, por diferentes razones cambiaron el enfoque de esta carrera y se dedicaron a temas más novedosos como Mecatrónica.

Por lo anterior se encuentran normalmente deficiencias de los profesionales dedicados a la Instrumentación, especialmente en procesos industriales. Estas debilidades solo se pueden superar con estudio y años de experiencia.

Espero que el tiempo dedicado a este libro despierte en ustedes el interés por una labor que puede llegar a ser exclusiva de unos pocos; misma que me ha permitido compartir experiencias con cientos de alumnos, colegas y clientes en toda la geografía de Colombia; profesión de la cual me siento muy orgulloso.

Capítulo I

**FUNDAMENTOS DE
INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL**



I.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE CONTROL

I.1.1. Definición de proceso

Desde el punto de vista de producción, un proceso es una secuencia de pasos para la preparación del producto. Cada proceso incluye un grupo de equipos como reactores, tuberías, tanques, columnas de destilación, evaporadores, etc., en los cuales fenómenos físicos y químicos ocurren para lograr la preparación del producto.

Desde el punto de vista de control, un proceso es identificado como una o más variables asociadas, de las cuales es importante conocer sus valores y también deben ser controladas.

Un proceso puede ser relativamente simple como una caldera, donde se calienta agua para producir vapor o muy complejo como una planta petroquímica, donde la transformación del producto es una combinación de los siguientes pasos:

1. Transporte de materia prima y/o energía entre varias unidades de proceso.
2. Transferencia de calor entre las diferentes corrientes de proceso.
3. Transferencia de masa entre las diferentes corrientes de proceso.
4. Reacción de una mezcla de componentes o materias primas.
5. Separación de los componentes de la mezcla de un número determinado de corrientes, con diferentes grados de pureza.
6. Almacenamiento de materiales en los diferentes pasos del proceso y al final, antes de su distribución comercial.

El tipo de proceso seleccionado para un producto en particular, dependerá de la cantidad y los requisitos de producción. Para la fabricación de algunos productos el proceso por lotes es el adecuado, mientras que para la producción de otros productos y por razones económicas, solo el proceso continuo es el más apropiado.

I.1.1.1. Proceso por lotes (batches)

Es aquel en el cual un número de diferentes y sucesivas operaciones físicas y químicas son realizadas para convertir materias primas en un producto final deseado, en uno o varios tanques o reactores. Un proceso por lotes es realizado de acuerdo a una receta. La mezcla de ingredientes permanece en

un tanque o reactor, hasta que sus características hayan cambiado y cumplan con las especificaciones requeridas. En un proceso por lotes todo el manejo de materiales se realiza en un número limitado de tanques, que requieren espacio y equipos asociados. Los procesos por lotes son usados en:

1. Productos que son fabricados con diferentes fórmulas que tiene dosificación de pequeñas cantidades, como productos farmacéuticos y detergentes.
2. Productos costosos con mercado limitado, como perfumes.
3. Productos que requieren un periodo largo de fermentación o maduración, con condiciones estables como vino, cerveza, whiskey, etc.

1.1.1.2. Proceso continuo

En un proceso continuo, un producto es fabricado sin interrupción por un periodo largo de tiempo, excepto en caso de reparaciones de emergencia o paradas programadas de mantenimiento. La materia prima entra al proceso a una rata constante y es transformada a través de etapas, en diferentes equipos de proceso, hasta que el producto es entregado después de la última operación.

Cada unidad de proceso está dedicada a una tarea; recibe el material en las mismas condiciones y entrega el material transformado en forma continua. Debido a la gran cantidad de pasos y unidades físicas, los equipos de transporte (como bombas, bandas, ventiladores, etc.) juegan un papel importante en este tipo de procesos.

El tipo de control es diferente, comparado con los procesos por lotes. Los controladores tienen que asegurar que el proceso opera estable, aun en el caso de que se presenten perturbaciones. Ejemplo de procesos continuos son los siguientes: hornos de fundición de vidrio, refinerías, plantas químicas y petroquímicas, entre otras.

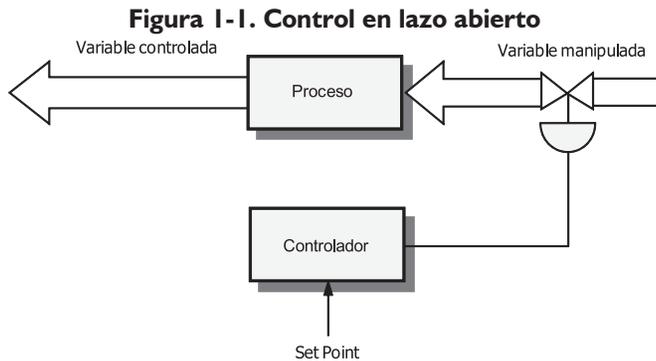
1.1.2. Control de proceso

Regulación o manipulación de las variables que afectan un proceso, con el fin de obtener el producto con la calidad y en la cantidad deseada, de una forma eficiente.

1.1.2.1. Control de lazo abierto

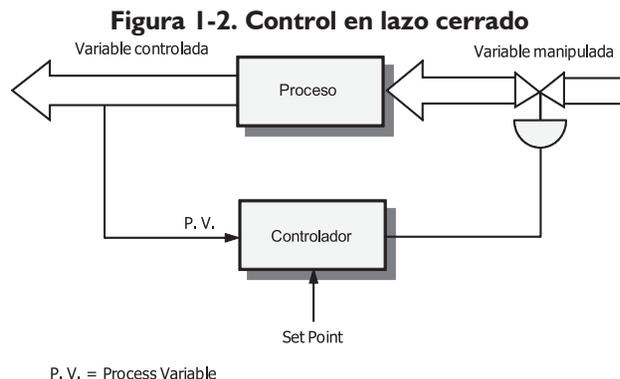
En un sistema de control de lazo abierto, una o más variables de entrada actúan sobre la variable del proceso o P.V. (*Process Variable*). El valor actual de la variable de proceso no es monitoreada, con la posibilidad de que posibles desviaciones causadas por perturbaciones, no puedan ser compensadas.

Un ejemplo de control de lazo abierto, es un sistema de lavado automático de autos. El sistema está diseñado para que en condiciones normales el auto salga limpio, pero no tiene posibilidad de verificar a la salida, si el auto quedó al final bien lavado o no.



1.1.2.2. Control de lazo cerrado

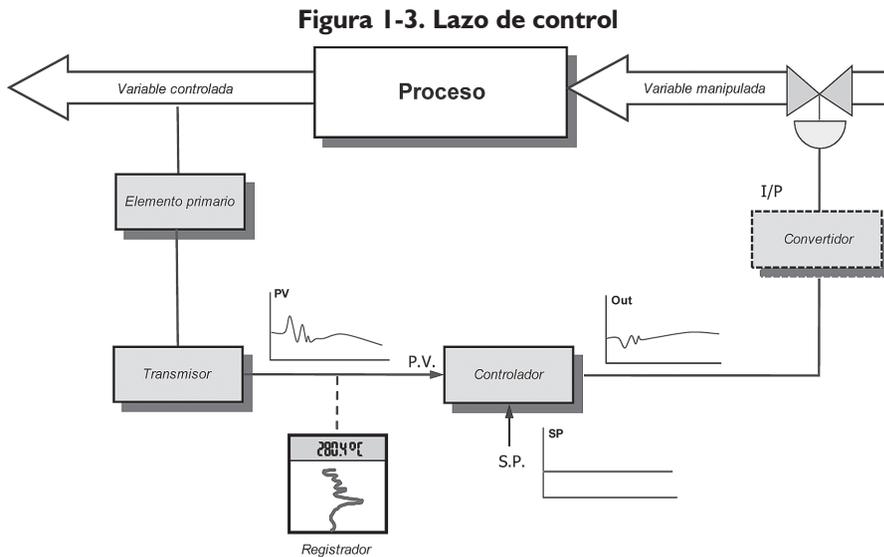
En un lazo de control cerrado, la variable controlada es continuamente medida y comparada con relación a un valor predeterminado o *Set Point* (S.P.). Si existe una diferencia entre las dos variables, los ajustes en el lazo de control, son realizados hasta que la diferencia es eliminada.



I.2. ELEMENTOS DE UN LAZO DE CONTROL

I.2.1. Lazo de control

Es la combinación de dos a más instrumentos o funciones de control, dispuestos de tal forma que la señal pasa de un instrumento a otro, con el fin de medir y/o controlar una variable del proceso.



I.2.2. Variable controlada

Es la variable física que debemos mantener en un valor constante en el lazo de control.

I.2.3. Variable manipulada

Es aquella que el controlador varía en su esfuerzo, por mantener la variable controlada en el valor deseado o *Set Point*. Por tal motivo, siempre vamos a encontrar una válvula de control o un elemento final de control, afectándola.

I.2.4. Perturbación

La o las variables que ocasionan que la variable de control se desvíe del valor deseado o *Set Point*.

1.2.5. Set Point o punto de ajuste

Valor de la variable programado en el controlador que fija el valor en que se desea mantener la variable controlada.

1.2.6. Elemento primario

Es la parte del lazo de control o instrumento que responde al valor de la variable y realiza la operación inicial de medición. También es llamado sensor o detector.

El efecto producido por el elemento primario puede ser cambio de presión, fuerza, posición, potencial eléctrico o resistencia.

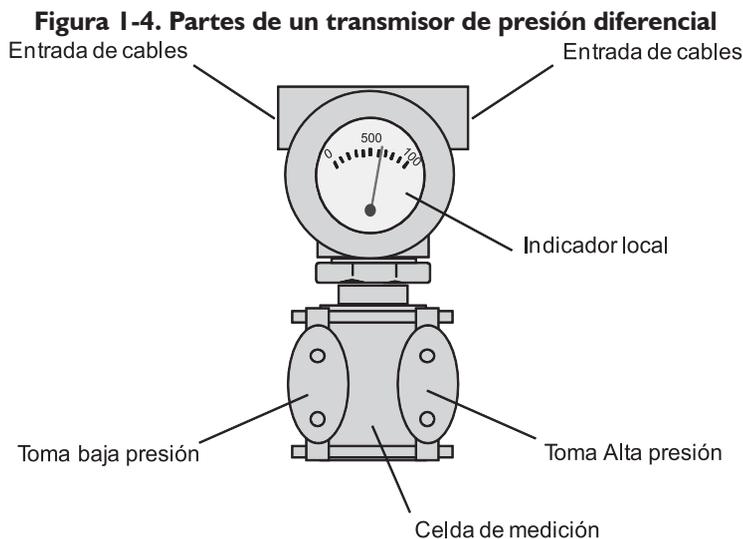
1.2.7. Transmisor

Instrumento que responde a los cambios de la variable medida por un elemento sensor y lo convierte a una señal de transmisión estándar, en función de la variable medida.

Los transmisores son necesarios, porque los sensores frecuentemente se encuentran a grandes distancias del controlador.

Los tipos más comunes de señal son: neumática y eléctrica. Un transmisor neumático convierte el valor de la señal medida en una presión de aire de 3... 15 psig, que es enviada por medio de un ducto neumático.

Un transmisor electrónico convierte la variable medida en una señal eléctrica, en un rango de corriente de 4...20 mA.



I.2.8. Controlador

Equipo que opera automáticamente, para regular la variable controlada.

Un controlador en función automática, varía su señal de salida en respuesta a los cambios de la variable medida. La salida manual de controlador puede ser variada solo por ajuste manual.

El controlador es el instrumento que toma las decisiones en el lazo de control y para hacerlo compara la señal de la variable del proceso (P.V.) que llega del elemento primario o del transmisor con el *Set Point* (S.P.) y envía una señal de salida apropiada a la válvula de control o elemento final.

Figura I-5. Diagrama de bloque de un controlador

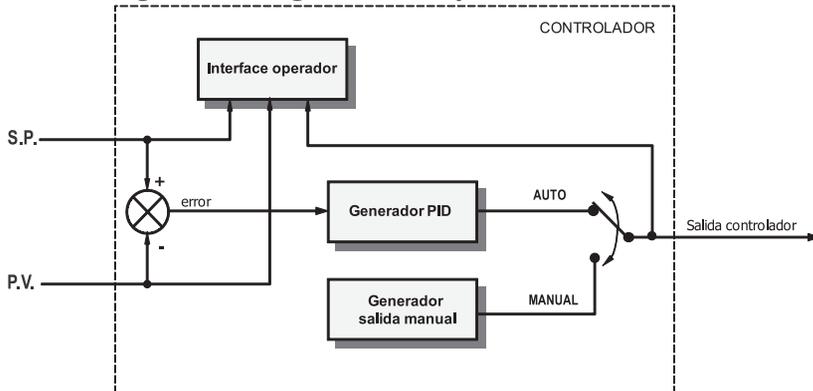
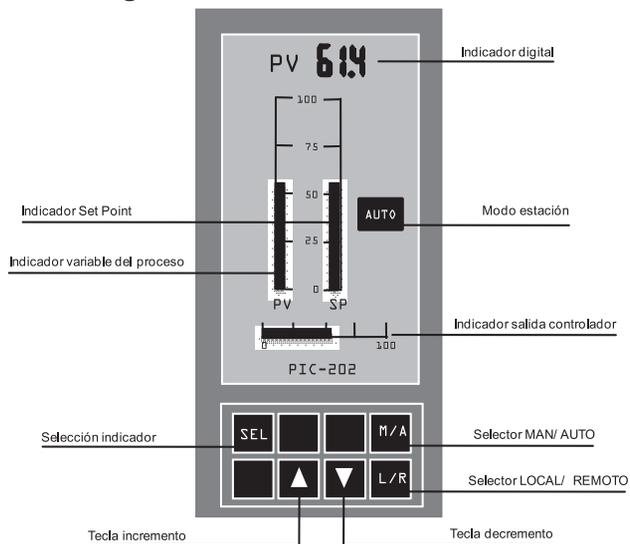


Figura I-6. Partes de un controlador



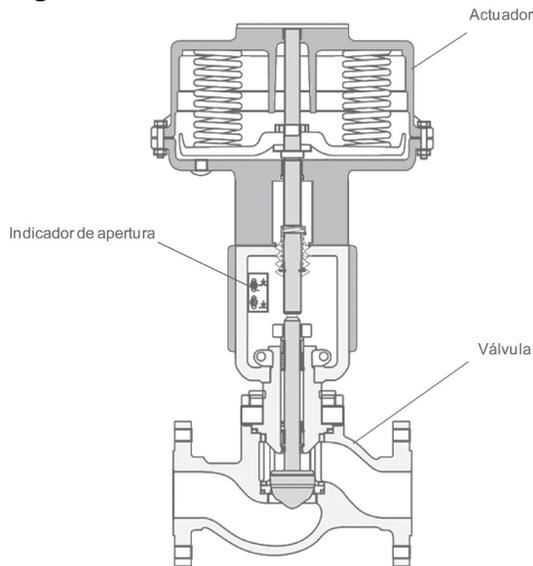
Todo controlador está compuesto por los siguientes elementos:

1. Selector MAN/ AUTO.
2. Indicador de la variable del proceso (P.V.).
3. Indicador del punto de ajuste o *Set Point* (S.P.).
4. Ajuste de *Set Point*.
5. Ajuste de la salida manual.
6. Selector LOCAL/ REMOTO del *Set Point*.

1.2.9. Elemento final de control

Actúa sobre el proceso modificando el valor de la variable manipulada, que cambia a su vez el valor de la variable a controlar. Dependiendo del proceso, el elemento final puede ser una válvula de control, un servomotor, una bomba dosificadora, un circuito electrónico basado en semiconductores (triacs o tiristores), etc.

Figura I-7. Partes de una válvula de control



1.2.10. Registrador

Instrumento encargado de graficar bien sea mediante trazos continuos o con puntos, los valores tomados por una o más variables, en los lazos de control. Su importancia radica en que mediante los trazos efectuados sobre la

carta se puede determinar en las condiciones en las que operó el proceso, en un periodo de tiempo determinado. Existen dos tipos básicos: Registradores de carta circular y registradores con rollo de papel.

Actualmente la función del registrador, está siendo reemplazada por las tendencias que pueden ser configuradas en los sistemas supervisorios.

Figura I-8. Registrador de rollo de papel

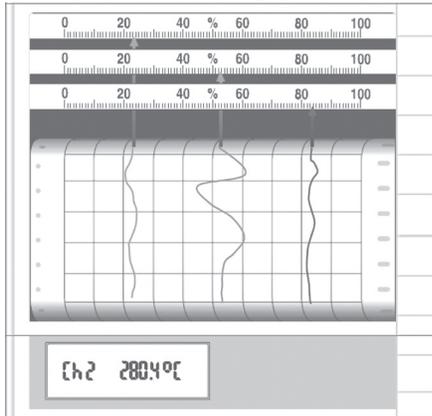


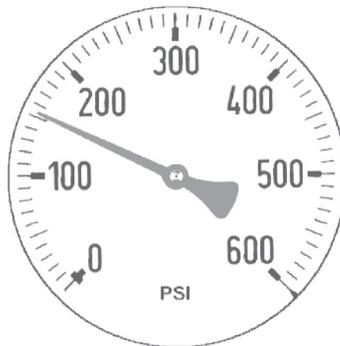
Figura I-9. Registrador de carta circular



1.2.11. Indicador

Instrumento que gráficamente muestra el valor de una variable.

Figura I-10. Indicador análogo de presión



1.2.12. Convertidor

Dispositivo que recibe en su entrada información en una forma de energía y la convierte en otra.

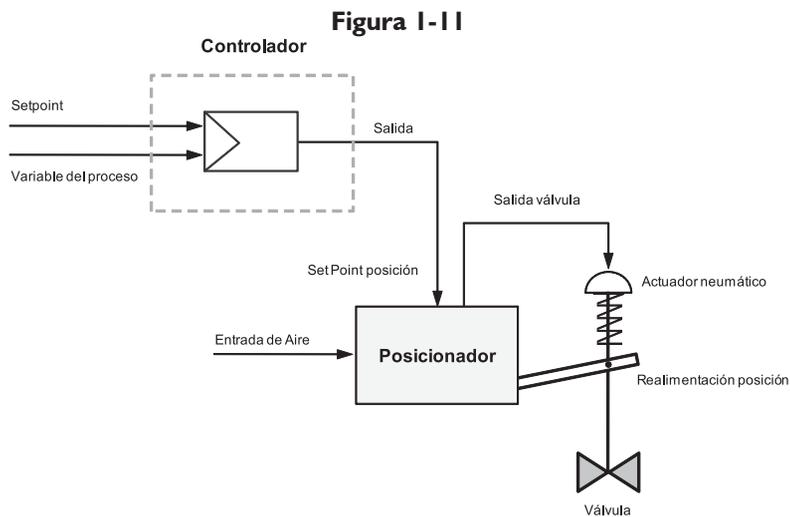
Ejemplos de convertidores de señal eléctrica incluyen: voltaje, corriente, frecuencia, resistencia, presión, presión diferencial, entre otras.

El dispositivo más usado es el convertidor I/P, que transforma una señal de corriente de 4...20 mA recibida del controlador, en una señal neumática de presión de 3...15 psig, para la válvula de control.

1.2.13. Posicionador

Es un elemento mecánico conectado a la parte en movimiento del elemento final o actuador de la válvula, que permite el ajuste automático de la presión de salida, con el fin de mantener una posición deseada, que mantenga una relación predeterminada con la señal enviada por el controlador.

El posicionador elimina los errores de histéresis y no linealidad, que son comunes en las válvulas de control.



BIBLIOGRAFÍA

- Antonio Creus Solé. Corripio (1988). *Control de Procesos Industriales*. Marcombo S.A.
- C. L., Albert; D. A., Coggan (1992). *Fundamentals of Industrial Controls*. Instrument Society of America.
- Douglas M., Considine (1993). *Process Industrial Instruments and Control Handbook*. 4^a edition, McGraw-Hill Inc.
- Harold L., Wade (1994). *Basic concepts, terminology and techniques for process control*. Instrument Society of America.
- Lewis M., Gordon (1983). *Regulatory and advanced regulatory control: system development*. Chemical Engineering.
- Smith, Carlos A.; Corripio, Armando B. (1991). *Control Automático de Procesos*. Editorial Limusa S.A.



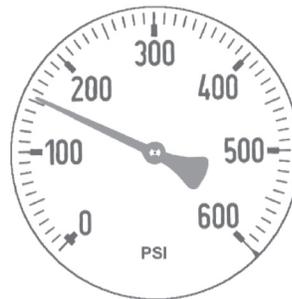
2.1. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

La terminología usada en el campo de la instrumentación y control de procesos, está basada en la norma ANSI/ ISA SI.1 “Process Instrumentation Terminology”. La norma intenta incluir los términos especializados usados en procesos industriales para describir el uso, desempeño, operación, influencias, hardware y calificación de productos, de instrumentos y sistemas usados en medición, control o ambos. Los términos que se tratarán a continuación, son usados en diferentes tipos de industrias como petróleo, química, generación de energía, alimentos y bebidas, textiles, plantas metalúrgicas, plantas de tratamiento de agua, entre otras.

2.1.1. Rango nominal

Región dentro de los límites en los cuales, una cantidad es medida, recibida o transmitida y es expresada por los valores inferior y superior de la escala del instrumento. Cada variable controlada o medida y cada instrumento, tienen un rango seleccionado. Para el caso del indicador de la figura 2-1, el rango nominal es: 0 a 600 psi.

Figura 2-1. Rango nominal



2.1.2. Intervalo de medida

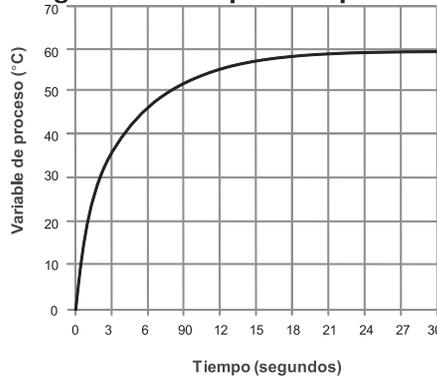
Diferencia algebraica entre los límites superior e inferior del rango nominal del instrumento. Para el caso del instrumento de la figura 2-1, el intervalo de medida o span es 600 PSI.

2.1.3. Tiempo de respuesta

Es la cantidad de tiempo requerida por un sensor, para que responda com-

pletamente a los cambios de una entrada. El tiempo de respuesta de un lazo de control es la combinación de los tiempos de respuesta de todas sus partes, incluyendo el sensor.

Figura 2-2. Tiempo de respuesta

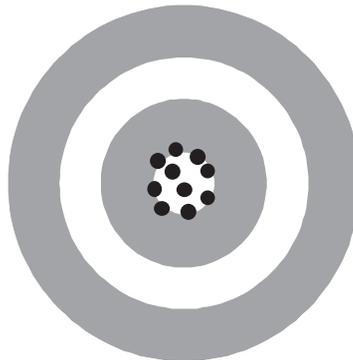


2.1.4. Exactitud

Es el grado de conformidad del valor medido, respecto a un valor reconocido y aceptado como estándar.

Para explicar de forma sencilla el concepto de exactitud, vamos a jugar tiro al blanco. Le damos 10 dardos al jugador No. 1 y en el tablero vamos a ver su desempeño. El jugador No. 1 puso los 10 dardos en el centro del tablero, pero la dispersión de los tiros es muy alta. La precisión de un equipo depende de la cercanía de su medida, con respecto a un valor definido como real o un patrón de medida. Si la medida del instrumento no coincide con el valor de referencia, es necesario su ajuste o calibración.

Figura 2-3. Exactitud

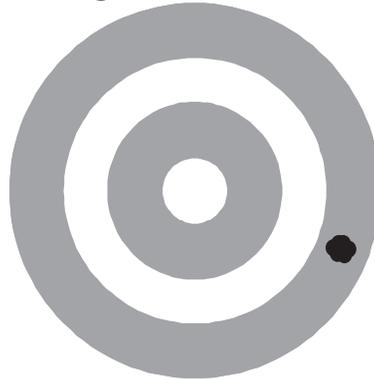


2.1.5. Precisión

Es la reproductividad con la cual medidas sucesivas de la misma variable pueden ser realizadas bajo condiciones idénticas.

Continuando con el ejemplo del tiro al blanco, ahora el jugador No. 2 lanza sus 10 dardos. Los dardos quedan ubicados uno muy cerca del otro, pero no se localiza en el centro del tablero. En este ejemplo el jugador No. 2 es preciso, pero no exacto.

Figura 2-4. Precisión



La precisión de un equipo depende de su proceso de fabricación. Esto quiere decir que entre mayor precisión se requiera, los fabricantes deben explorar mejores técnicas para desarrollar mejores circuitos de medición, mejores materiales, mayor estabilidad en la medida, etc., con el objetivo de reducir el límite de error. Al final la precisión depende del proceso de fabricación del instrumento y por lo tanto un equipo más preciso significa que es más costoso. Un equipo que este por fuera de la precisión especificada por el fabricante, no se puede ajustar y requiere ser reemplazado.

Por el contrario, un equipo que no sea exacto se puede ajustar, comparando la media actual con un patrón y compensando la diferencia en su medida.

2.1.6. Rango de exactitud

Un número que define un límite de error que no deberá excederse, bajo las condiciones de operación de referencia. Este puede incluir los efectos combinados de histéresis, linealidad y repetibilidad.

2.1.7. Unidades de exactitud

La máxima desviación positiva o negativa observada en un dispositivo bajo prueba. Puede ser expresada:

- Términos de variable medida, por ejemplo ± 1 PSI.
- Porcentaje de la lectura, por ejemplo $\pm 0,5\%$ O.R. (Over Reading).
- Porcentaje del span calibrado, por ejemplo $\pm 0,5\%$ O.S. (Over Span).
- Porcentaje de full escala, por ejemplo $\pm 0,5\%$ O.F.S. (Over Full Scale).

2.1.8. Coeficiente de temperatura

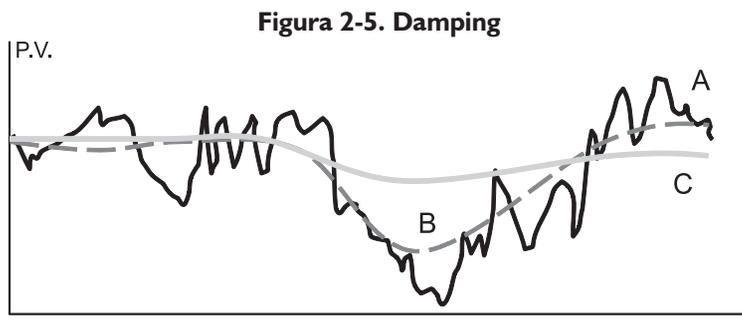
La cantidad de desplazamiento que puede resultar de un cambio de la temperatura ambiente de 1°C y expresado en porcentaje de full escala.

2.1.9. Damping

Reducción progresiva de la oscilación en un equipo o sistema.

Para el caso de la figura 2-5, la curva A no tiene damping, por lo tanto, la señal es inestable y ruidosa.

Esto puede ocasionar que el lazo de control también sea inestable. Para el caso de la curva C, el damping es excesivo.



2.1.10. Banda muerta

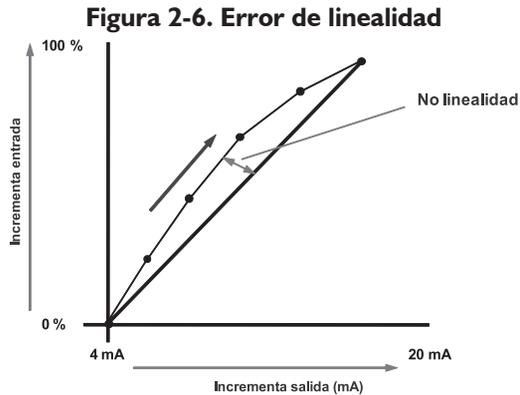
El rango a través del cual una entrada puede ser variada sin causar una respuesta medible. La banda muerta usualmente es expresada en porcentaje del intervalo de medida (span).

2.1.11. Tiempo muerto

El intervalo entre la iniciación de un cambio en la entrada y el comienzo de una respuesta observable en el instrumento.

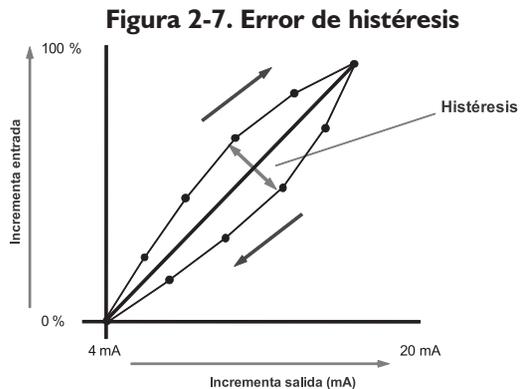
2.1.12. Linealidad

Es la desviación de la curva de calibración del instrumento a una línea recta de referencia. La linealidad es expresada como la máxima desviación de algún punto de calibración a una línea recta especificada durante un ciclo de calibración. Es expresada en porcentaje de la salida a full escala.



2.1.13. Histéresis

La máxima diferencia en la salida en algún valor medido dentro del rango especificado, cuando el valor se verifica primero incrementando y luego decrementando la variable medida. Se expresa como porcentaje de full escala, durante un ciclo de calibración.

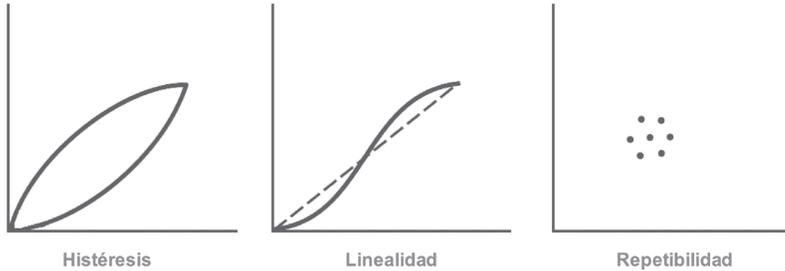


2.1.14. Repetibilidad

Es la habilidad de un instrumento para reproducir lecturas de salida, cuan-

do un mismo valor medido es aplicado, bajo las mismas condiciones y en la misma dirección.

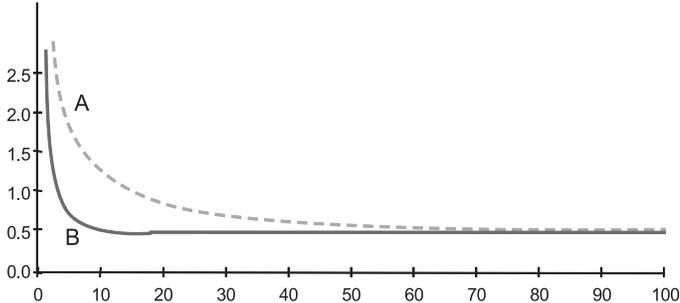
Figura 2-8. Error de repetibilidad



2.1.15. Rango de ajuste

Describe la relación entre el rango nominal y la mínima cantidad que puede ser medida con la precisión especificada por el fabricante. En la figura 2-9 el instrumento B tiene mayor rango de ajuste que el instrumento A, porque puede mantener la precisión con valores más bajos de flujo.

Figura 2-9. Rango de ajuste



2.1.16. Turndown

Se define como la relación entre el valor máximo y mínimo que puede tomar el span del instrumento.

Esta función permite reducir un inventario de equipos en *stock*, porque un mismo instrumento con un turndown alto puede ser configurado para diferentes rangos. Por ejemplo, una planta tiene cuatro transmisores de presión diferentes para medir presiones hasta 100 psig. Un equipo se necesita en el rango de 0...10 psig, el segundo de 0...30 psig, el tercero de 0...60 psig y el

último de 0...100 psig. Con un solo instrumento que se tenga disponible de 0...100 psig podemos cubrir los cuatro equipos. Esto solo aplica a instrumentos con tecnología electrónica. Los instrumentos análogos como los manómetros tienen un turndown fijo que es de 1:1.

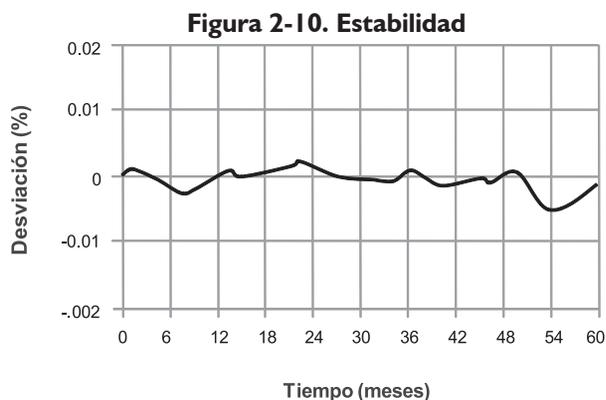
Se debe tener en cuenta que en el caso de ajustar un rango de calibración muy bajo con respecto al rango del instrumento, se sacrifica precisión.

2.1.17. Sensibilidad

Es el más pequeño cambio en el valor actual de la magnitud medida que pueda producir un cambio perceptible en un instrumento indicador, registrador, etc.

2.1.18. Estabilidad

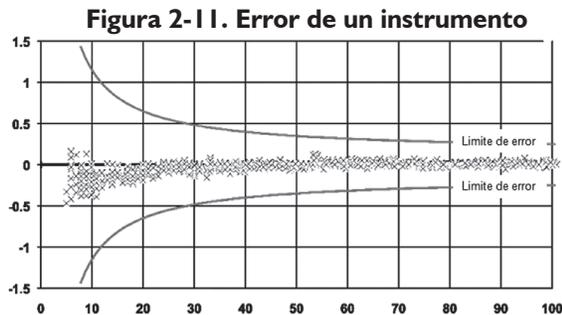
Es la habilidad de un transductor para mantener sus características de desempeño por un periodo de tiempo relativamente largo. Es expresado en porcentaje de full escala por un periodo de tiempo dado en meses. Un valor típico de estabilidad en instrumentos inteligentes es: 0,25%/ 5 años. Esto significa que si la desviación de la calibración en un valor de 0,25% no es significativa en el proceso, el instrumento puede desmontarse en el año quinto para ser recalibrado.



2.1.19. Error

La diferencia entre el valor de la señal medida o la lectura actual y el valor real (ideal) o deseado. Cada fabricante define los límites de error del instru-

mento en las condiciones de operación especificadas. Cada medida sucesiva del instrumento se grafica con una x, en la figura 2-11.



2.1.20. Error estático

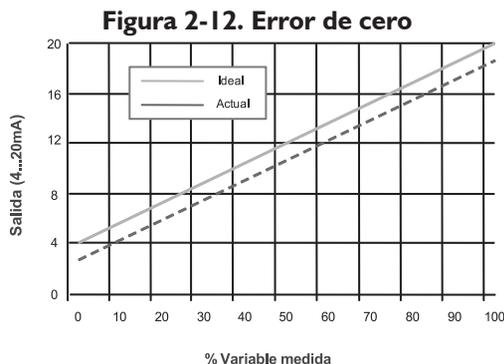
Diferencia que presenta el instrumento respecto al valor verdadero de la magnitud medida, cuando se tienen constantes las condiciones del proceso.

2.1.21. Error dinámico

Se produce debido a la variación de las condiciones del proceso como la velocidad del fluido, temperatura, elemento primario, etc.

2.1.22. Error de cero

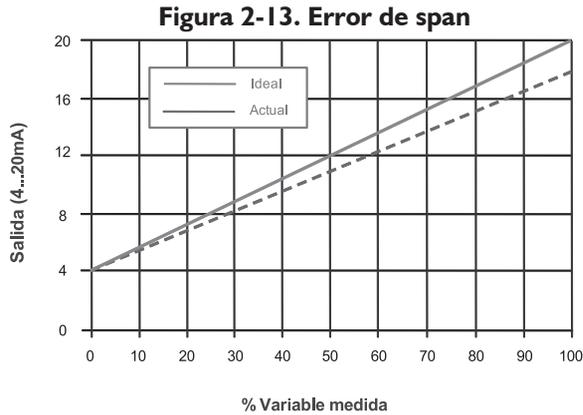
En instrumentación de procesos, el error de cero es la diferencia que presenta un instrumento en el valor bajo, cuando el mismo es operando en las condiciones especificadas de uso. Para realizar este ajuste, en el instrumento normalmente se tiene una tecla o ajuste local que se denota con la letra Z (Cero).



2.1.23. Error de span

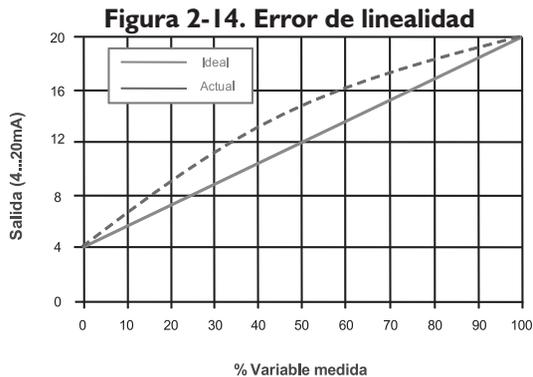
En el caso de calibración, el error de span es la diferencia entre el valor actual y el valor máximo de referencia. Este ajuste se debe realizar idealmente con el 100% del rango del instrumento o en su defecto con al menos el 75% del mismo. Para poder realizar este ajuste en el instrumento normalmente se tiene una tecla o ajuste local, que se denota con la letra S.

El ajuste de span no se debe confundir con el span del instrumento.



2.1.24. Error de linealidad

En instrumentos con tecnología análoga, después de realizar el ajuste de cero (0%) y span (100%), era necesario un ajuste adicional en el 50% del rango del instrumento. Con este ajuste se reducía el error de calibración en el punto medio del rango del instrumento.

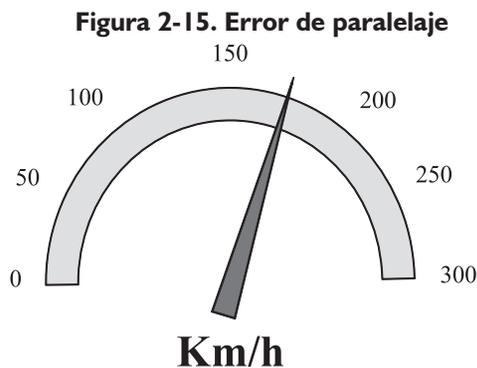


2.1.25. Error de paralelaje

Este error se produce en los instrumentos análogos, debido a la posición del observador con respecto a la carátula del instrumento.

Un ejemplo de errores en la lectura de instrumentos análogos, es el indicador de velocidad en un auto. La lectura de velocidad es diferente para el conductor y el pasajero debido a la posición de los mismos.

Por esta razón en los instrumentos de precisión, la carátula tiene un espejo para que el observador pueda corregir su posición. El observador está bien ubicado cuando se encuentra perfectamente perpendicular al instrumento y solo puede visualizar un puntero.



2.1.26. Efecto de la temperatura

Puede provocar un error en el desempeño del instrumento por cambios en el proceso o en la temperatura ambiente. Generalmente la temperatura del proceso es estable mientras que la temperatura ambiente cambia. Por eso no siempre es fácil, determinar las causas del error por efecto de la temperatura.

2.1.27. Efecto de la presión estática

Es el efecto ejercido por la presión del fluido aplicada tanto al lado de baja como al lado de alta presión en un transmisor. Este efecto involucra tanto errores de Cero (Z) como de Span (S). Los errores de Cero pueden ser fácilmente corregidos ajustando el mecanismo de Cero del transmisor a la presión estática de la línea.

Por el contrario, la determinación del error de Span requiere equipos sofisticados. Por esta razón muchos fabricantes no suministran información de este efecto, haciendo muy difíciles las correcciones.

2.1.28. Efecto de la vibración

Muchas de las especificaciones se refieren a vibración sinusoidal, la cual puede o no presentarse durante el servicio. El eje de la vibración es importante para algunos transmisores de tipo balanceado, los cuales son más sensibles a la vibración en ciertos planos. La habilidad de un transmisor para soportar choques, es tan importante como la misma vibración.

2.1.29. Efecto de la fuente de alimentación

Es el efecto de las variaciones de la fuente de alimentación en el desempeño del transmisor. Los componentes electrónicos y la técnica disponible actualmente prácticamente eliminaron algún tipo de problema.

2.1.30. Elevación de cero

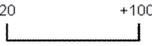
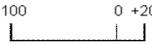
En un instrumento con rango de cero elevado, el valor de cero de la variable medida está por encima del valor más bajo del rango nominal del instrumento.

2.1.31. Supresión de cero

En un instrumento con rango de cero suprimido, el valor de cero de la variable medida está por debajo del valor más bajo del rango nominal del instrumento.

En la tabla 2-1 se pueden encontrar ejemplos de instrumentos con supresión y elevación de cero.

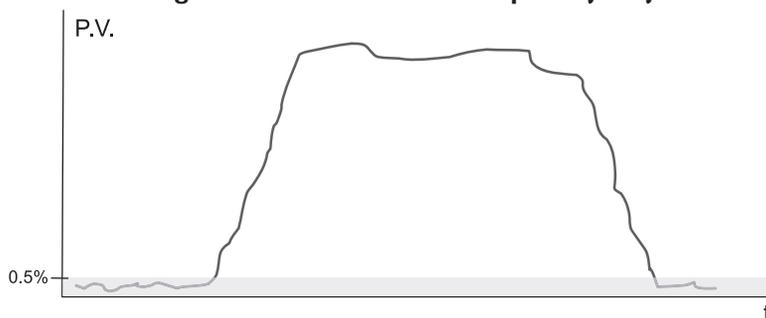
Tabla 2-1. Supresión y elevación de cero

Rango/ nombre	Rango	L.R.V.	U.R.V.	Span
 0 a +100	0 a 100°C	0 °C	100°C	100°C
 Rango de cero suprimido	20 a 100°C	20 °C	100°C	80°C
 Rango de cero elevado	-25 a 100°C	-25 °C	100°C	125°C
 Rango de cero elevado	-100 a 0°C	-100 °C	0°C	100°C
 Rango de cero elevado	-100 a -20°C	-100 °C	-20°C	80°C

2.1.32. Corte por bajo flujo

Función en los medidores de flujo que permite habilitar un rango en porcentaje, por debajo del cual la lectura del medidor se toma como cero. Esto permite mantener la estabilidad en los medidores de flujo, en condiciones donde no se sabe con certeza si el flujo es muy bajo, es generado por perturbaciones del proceso o inestabilidad de los instrumentos. Los valores típicos de ajuste, normalmente están entre 0,1 y 1,5% del rango máximo del instrumento.

Figura 2-16. Función de corte por bajo flujo



BIBLIOGRAFÍA

- ANSI/ ISA S51.1 (1995). *Process Instrumentation Technology*, Instrument Society of America.
- Cubberly, W. H. (1991). *Comprehensive dictionary of measurement and control*. Instrument Society of America.
- C.L., Albert; D.A., Coggan (1992). *Fundamentals of Industrial Controls*. Instrument Society of America.
- Szklanny, Carlos; Behrends, Carlos (1994). *Sistemas digitales de control de procesos*. Editorial Control S.R.L.

Capítulo 3

SIMBOLOGÍA



Grabado prehispánico, Arequipa, Perú

3.1. P&ID (PIPING AND INSTRUMENTATION DIAGRAM)

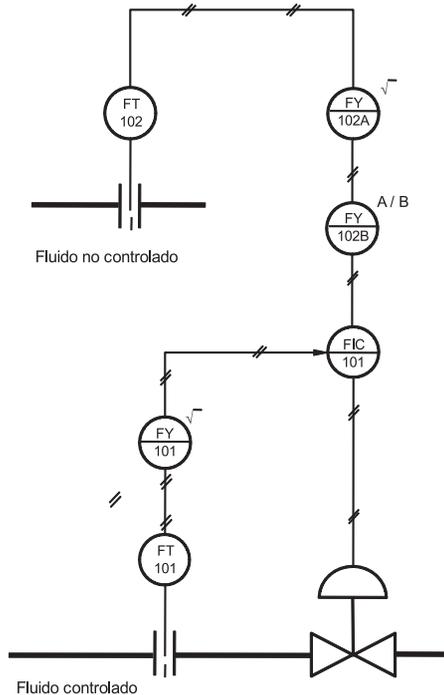
Los ingenieros de proceso, de instrumentación y control usan diagramas gráficos llamados “Piping and Instrumentation Diagrams” para representar los equipos de proceso y lazos de control.

Los P&ID típicamente usan una forma estándar de símbolos, para representar varios tipos de instrumentos y equipos. Existen dos entidades encargadas de definir la simbología: ISA (Instrument Society of America) y SAMA (Scientific Apparatus Manufacturers Association).

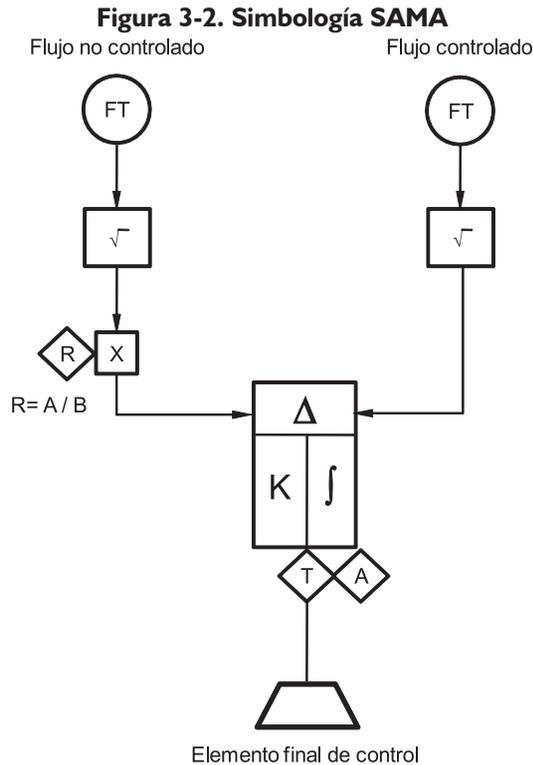
La simbología ISA está contenida en la norma ANSI/ISA S5.1-1984 (recientemente actualizada en la norma ANSI/ISA S5.1-2009). La simbología ISA indica en forma gráfica el tipo de equipo donde está localizado (en el tablero de control, en el campo, etc.) y el tipo de señal generada (neumática, eléctrica, etc.). El diagrama P&ID muestra las unidades de proceso, las tuberías de interconexión, los instrumentos y el sistema de control.

Los P&ID son los más usados en la industria y en la mayoría de compañías de ingeniería, aunque algunas grandes compañías usan simbología propia para sus aplicaciones.

Figura 3-1. Simbología ISA



El otro sistema de simbología frecuentemente usado para instrumentación y control es la norma SAMA. Note que los símbolos SAMA suministran información funcional, detalles sobre el equipo, pero no define simbólicamente dónde está localizado y qué tipo de tecnología usa (neumática o eléctrica). Los símbolos SAMA son ampliamente usados en aplicaciones de energía y por muchos fabricantes de equipos, principalmente en sistemas de control distribuido (DCS).



En la tabla 3-1 se podrán encontrar los símbolos generales usados por SAMA:

Otros documentos usados son los diagramas de lazo. Son elaborados por los departamentos de instrumentación para mostrar los componentes del lazo, el cableado, el algoritmo usado y la filosofía de control. El nivel de detalle depende de cada compañía.

En la figura 3.3 se muestra un diagrama típico de un lazo de control.

Tabla 3-1. Simbología SAMA

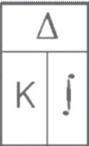
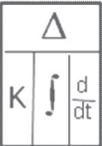
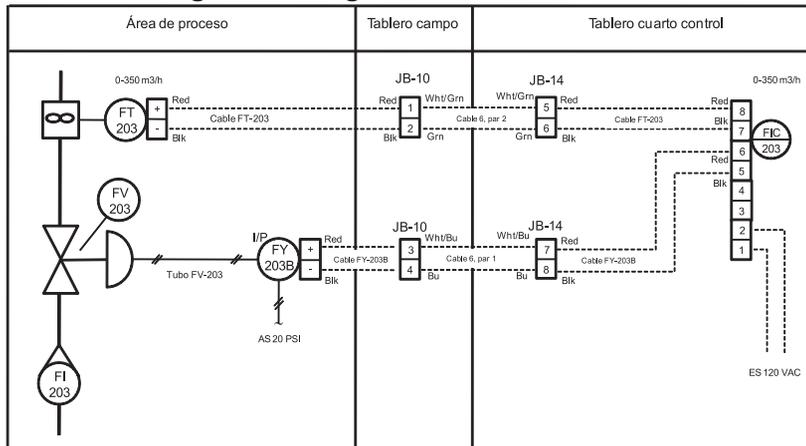
				
Medición	Procesamiento automático de señal	Procesamiento manual de señal	Selector Manual/Automático	Ajuste de operador (Set Point o salida del controlador)
				
Elemento final de control	Controlador PI	Controlador PID	Extractor raíz cuadrada	Sumador
				
Multiplicador	Divisor	Monitor de señal alta (alarma)	Monitor de señal baja (alarma)	Monitor de señal alta/ baja (alarma)
				
Selector de señal alta	Selector de señal baja	Limitador de señal alta	Limitador de señal baja	Limitador de velocidad
				
Función	La salida es función temporizada de la entrada			

Figura 3-3. Diagrama de lazos de control



3.2. HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS (DATA SHEET)

La selección de equipos para medición y control y su posterior compra es responsabilidad del ingeniero de diseño de proceso. Sin embargo, el ingeniero de diseño debe trabajar en conjunto con los ingenieros mecánicos, técnicos de proceso y los proveedores de equipos, para obtener la información vital para la selección adecuada.

La primera fuente de información son los diagramas P&ID. Estos diagramas indican los lazos de control en el proceso, sus funciones como ratas de flujo normales y máximas y las principales líneas primarias y secundarias del proceso.

Los diagramas de localización generalmente definen el sitio de montaje de cada instrumento y muestran los puntos de succión y descarga de las bombas. Con base en esta información es posible calcular la presión estática y la caída de presión en las tuberías, las propiedades del fluido como la temperatura, presión, pH, humedad, conductividad, etc.

Los datos necesarios para poder especificar los instrumentos se encuentran contenidos en las hojas de especificación. Una gran cantidad de formatos de los instrumentos más frecuentemente usados se encuentran contenidos en la norma ANSI/ISA S20 "Specification forms for process measurement and control instruments, primary elements and control valves".

Adicional a los P&ID y los data sheets, otros documentos son usados durante la fase de ejecución de proyectos, como:

- Diagramas de flujo de proceso (Process Flow Diagram).
- Lista de instrumentos.
- Diagramas lógicos.
- Diagramas de lazos.
- Típicos de montaje (Installation details).
- Localización de instrumentación en la planta.

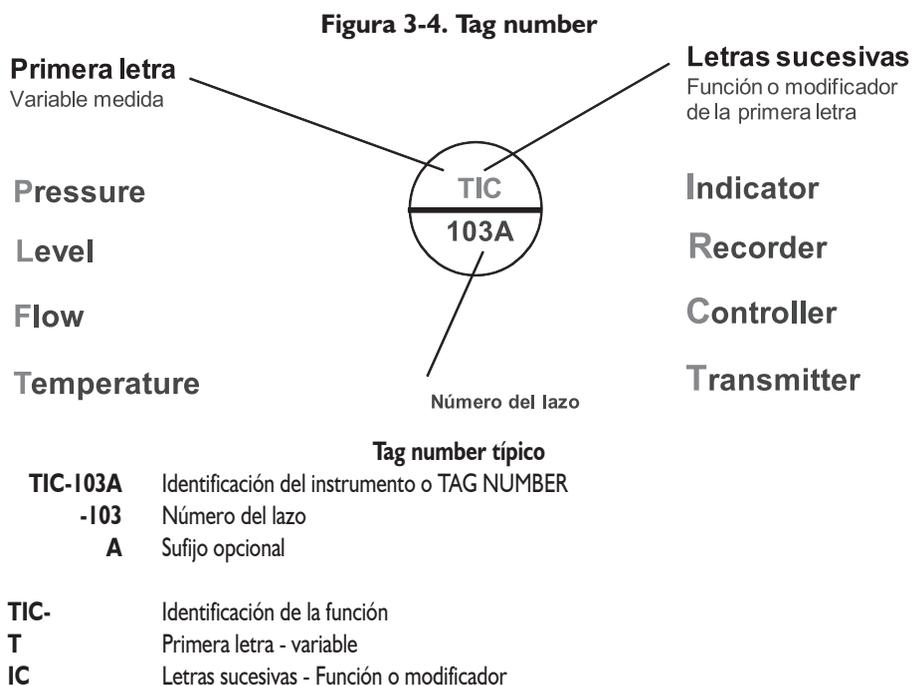
Tabla 3-2. Hoja de especificación transmisores de presión

		PRESSURE INSTRUMENTS				SHEET 1 OF 1	
						SPEC. NO.	
						REV.	
		NO.	BY	DATE	REVISION	CONTRACT	
						DATE	
						REQ. P.O.	
						BY	CHKD
						APPR.	
1 Tag No.		Service					
2 Function		Record	Indicate <input checked="" type="checkbox"/>	Control	Blind	Trans. <input checked="" type="checkbox"/>	
3 Case		Other _____					
4 Mounting		MFR STD <input checked="" type="checkbox"/>	Nom. Size _____	Color: MFR STD <input checked="" type="checkbox"/>		Other _____	
5 Enclosure Class		Flush _____	Surface _____	Yoke _____	Other <u>2" Pipe mounting in SS</u>		
6 Power Supply		General Purpose _____		Weatherproof _____	Explosion Proof <input checked="" type="checkbox"/>	Class <u>NOTE 1</u>	
7 Chart		For Use In Intrin. Safe System <input checked="" type="checkbox"/> Other _____					
8 Chart Drive		117V 60Hz _____	Other AC _____	DC <u>2 4</u>	Volts _____		
9 Scales		Strip _____	Roll _____	Fold _____	Circular _____	Time Marks _____	
		Range _____		Number _____	Power _____		
		Type _____		Speed _____			
		Range 1 _____		2 _____	3 _____	4 _____	
10 XMTR		Transmitter Output					
		4-20 mA _____ 10-50 mA _____ 21-103 kPa (3-15 psig) _____ Other <u>PROFIBUS PA</u>					
		For Receiver See Spec. Sheet _____					
11 CONTROLLER		Control Modes					
		P=Prop (Gain) _____ I=Integral (auto-Reset) _____ D=Derivative (Rate) _____					
		Sub: s=Slow _____ f=Fast _____					
		Other _____ P _____ PI _____ PD _____ PID _____ If _____ Df _____ Is _____ Ds _____					
12 Action		On Meas. Increase Output: _____ Increases _____ Decreases _____					
13 Auto-Man Switch		None _____ MFR STD _____ Other _____					
14 Set Point Adj.		Manual _____ External _____ Remote _____ Other _____					
15 Manual Reg.		None _____ MFR STD _____ Other _____					
16 Output		4-20 mA _____ 10-50 mA _____ 21-103 kPa (3-15 psig) _____ Other _____					
17 ELEMENT		Service					
18 Element Type		Gage Press. <input checked="" type="checkbox"/>	Vacuum _____	Absolute _____	Compound _____		
19 Material		Diaphragm <input checked="" type="checkbox"/>	Helix _____	Bourdon _____	Bellows _____ Other _____		
20 Range		316 SS <input checked="" type="checkbox"/>	Ber. Copper _____	Other _____			
		Fixed _____	Adj. Range <input checked="" type="checkbox"/>	Set At _____			
21 Process Data		Overrange Protection To _____					
22 Process Conn.		Press: _____ Normal <u>3 0 0</u> _____ Max. <u>6 0 0</u> _____ Element Range <u>9 1 4</u>					
		1/4 in. NPT _____ 1/2 in. NPT <input checked="" type="checkbox"/> _____ Other _____					
		Location: _____ Bottom <input checked="" type="checkbox"/> _____ Back _____ Other _____					
23 Alarm Switches		Quantity _____ Form _____ Rating _____					
24 Function		Press. _____ Deviation _____ Contacts To _____ On Inc. Press. _____					
25 OPTIONS		Options					
		Fill-Reg _____ Sup. Gage _____ Output Gage _____ Charts _____					
		Diaph Seal _____ Type _____ Diaph. _____ Bot. Bowl _____					
		Conn. _____ Capillary: Length _____ Mtl. _____					
		Other <u>DOUBLE SHUT OFF VALVES DN5 WITH VENT AND TEST CONNECTION 1/4" 18 NPT</u>					
26 MFR & Model No.							
Notes:							

3.3. SIMBOLOGÍA

La simbología usada para designar instrumentos y sistemas de medición y control, está basada en la norma ANSI/ISA S5.1 “Instrumentation symbols and identification”. En este capítulo se presenta un resumen de los símbolos usados con más frecuencia en la mayoría de las aplicaciones industriales. Para instrumentos y sistemas que no se encuentren en este documento, se sugiere consultar la norma completa.

Cada instrumento o función es designada por un código alfanumérico o tag number como se muestra en la figura 3-4. La identificación del lazo es parte del tag number y generalmente es común para todos los instrumentos o funciones del lazo. Un sufijo o prefijo puede ser agregado para completar la identificación, en caso que dos o más instrumentos, tengan el mismo tag number.



El número del lazo puede incluir información codificada como la designación del área de la planta y funciones especiales; por ejemplo, las series 900 a 999 normalmente son usadas por lazos, donde la función principal está relacionada con la seguridad.

Cada instrumento es representado por un símbolo que está acompañado por el tag number. La función de identificación del instrumento consiste en

una secuencia de letras, de acuerdo a la tabla 3-3. La primera letra es usada para designar la variable medida y una o más letras sucesivas identifican la función realizada.

Tabla 3-3. Letras de identificación instrumentos

Letras de identificación					
	Primera letra		Letras sucesivas		
	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5
	Variable medida	Modificador variable	Función pasiva	Función activa	Modificador función
A	Analysis				
B	Burner, Combustion		User's choice	User's choice	User's choice
C	User's choice				
D	User's choice			Control	Close
E	Voltage		Sensor, Primary Element		
F	Flow, Flow Rate	Ratio			
G	User's choice		Glass, Gauge, Viewing device		
H	Hand				High
I	Current		Indicate		
J	Power		Scan		
K	Time, Schedule	Time Rate of change		Control station	
L	Level		Light		Low
M	User's choice				
N	User's choice		User's choice	User's choice	User's choice
O	User's choice		Orifice, Restriction		Open
P	Pressure		Point (Test Connection)		
Q	Quantity	Integrate, Totalize	Integrate, Totalize		
R	Radiation		Record		
S	Speed, Frequency	Safety		Switch	Stop
T	Temperature			Transmit	
U	Multivariable		Multifunction	Multifunction	
V	Vibration, Mechanical Analysis			Valve, Damper, Louver	
W	Weight, Force		Well, Probe		
X	Unclassified	X-axis	Accessory Devices Unclassified	Unclassified	Unclassified
Y	Event, State, Presence	Y-axis		Auxiliary Devices	
Z	Position, Dimension	Z-axis, Safety Instrumented System		Driver, Actuator, Unclassified final control element	

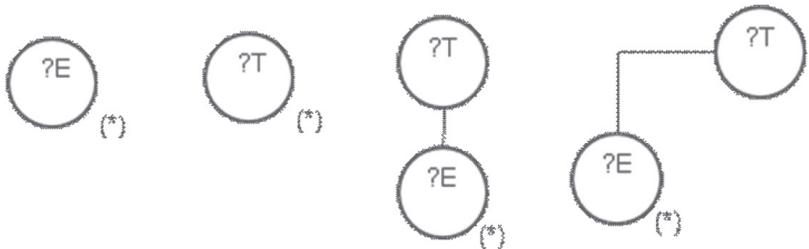
3.3.1. Simbología de líneas

				
Conexión de instrumento a proceso y equipo	Línea con calefacción o enfriamiento o línea de muestra del proceso: ET (electrical), ST (steam), CW (chilled water)	Instrumento genérico, conexión a línea del proceso	Línea de proceso o instrumento, con línea de impulso (<i>tracing</i>)	Instrumento con línea de impulso (<i>tracing</i>)
				
Instrumento flachado, conexión a línea o a equipo de proceso	Instrumento roscado, conexión a línea o a equipo de proceso	Instrumento con socket soldado, conexión a línea o a equipo de proceso	Instrumento soldado, conexión a línea o a equipo de proceso	
				
Suministro de presión requerida, IA (Instrument Air), PA (Plant Air), NS (Nitrogen), GS (Gas),	Suministro de potencia eléctrica, ejemplo: ES-24 VDC	Suministro de potencia hidráulica, ejemplo: HS-70 psig	Señal no definida	Señal neumática continua o binaria
				
Señal eléctrica o electrónica, analógica o binaria	Señal hidráulica	Elemento de relleno térmico, con tubo capilar. Línea con líquido de relleno entre sello de presión e instrumento	Señal electromagnética guiada, señal sónica guiada o cable de fibra óptica	Señal electromagnética no guiada, luz, radiación, radio, sonido, wireless Señal de instrumentación inalámbrica
				
Enlace de comunicación y sistema de bus, entre dispositivos, DCS, PLC o PC, enlace de comunicación y sistema de bus	Enlace de comunicación y sistema de bus, entre dos o más sistemas independientes. DCS a DSC, DSC a PLC, PLC a PC, DSC a fieldbus, etc.	Enlace de comunicación entre un dispositivo y un dispositivo de calibración remota. Enlace de y/o a dispositivos inteligentes (<i>Smart transmitters</i>)		

3.3.2. Simbología instrumentos

	Instrumento localizado en campo	Instrumento localizado en el panel principal	Instrumento localizado en panel secundario	Instrumento localizado detrás del panel
Instrumento discreto				
Sistema de control de proceso básico				
Sistema de computador y software				
Sistema instrumentado de seguridad				

3.3.3. Símbolos de elementos primarios y transmisores

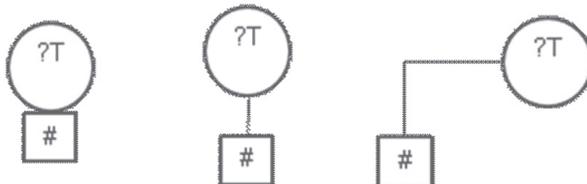


Elemento primario genérico

Transmisor con elemento primario integral

Transmisor con elemento primario cercado

Transmisor con elemento primario remoto



Transmisor con elemento primario integral, instalado en línea de proceso, tanque o equipo

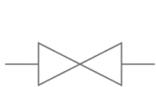
Transmisor con elemento primario cercano instalado en línea de proceso, tanque o equipo

Transmisor con elemento primario remoto instalado en línea de proceso, tanque o equipo

Teniendo en cuenta que la norma es extensa, solo se incluye como ejemplo la notación de los diferentes tipos de medición de variable analítica:

AIR	Excess air	H ₂ O	Water	O ₂	Oxygen
CO	Carbon monoxide	H ₂ S	Hydrogen sulfide	OP	Opacity
CO ₂	Carbon dioxide	HUM	Humidity	ORP	Oxidation reduction
COL	Color	IR	Infrared	pH	Hydrogen ion
COMB	Combustibles	LC	Liquid chromatograph	REF	Refractometer
COND	Elec. conductivity	MOIST	Moisture	RI	Refractive index
DEN	Density	MS	Mass spectrometer	VIS	Visible light
GC	Gas chromatograph	NIR	Near infrared	TDL	Tunable diode laser
UV	Ultraviole	TC	Thermal conductivity	VISC	Viscosity

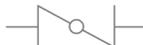
3.3.4. Simbología válvulas



Globo o compuerta



Ángulo



Mariposa



Bola



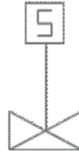
Válvula accionada por motor



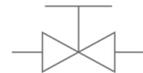
Válvula accionada por diafragma



Válvula accionada por cilindro de doble efecto

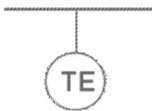


Válvula accionada por solenoide

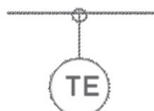


Válvula accionada manualmente

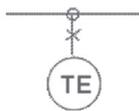
3.3.5. Simbología instrumentos de temperatura



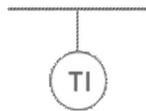
Elemento de temperatura sin termopozo



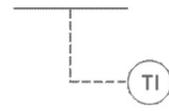
Elemento de temperatura con termopozo



Bulbo-capilar con termopozo



Bimetalico, de vidrio u otro elemento local

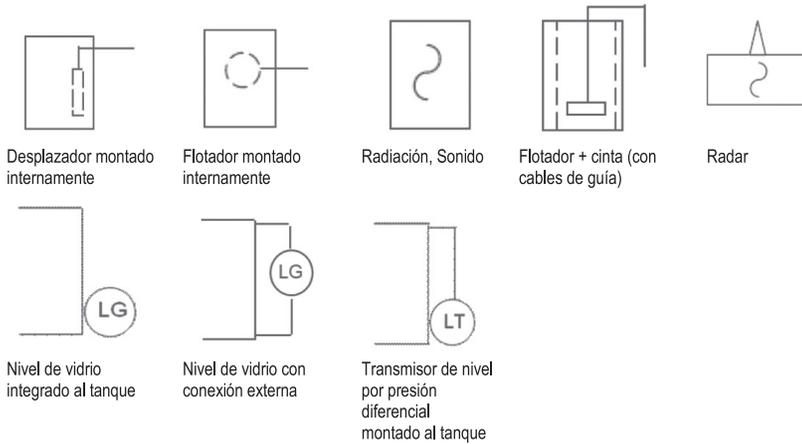


Indicador de temperatura por termocupla o sonda resistiva

3.3.6. Simbología instrumentos de presión



3.3.7. Simbología instrumentos de nivel



3.3.8. Simbología instrumentos de flujo



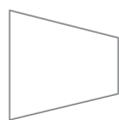
3.3.9. Simbología de equipos de proceso



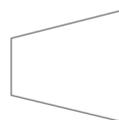
Bomba



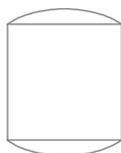
Ventilador



Compresor



Turbina



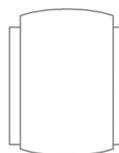
Reactor



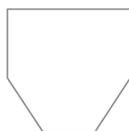
Tanque



Torre de destilación



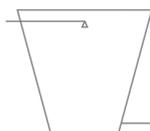
Tanque enchaquetado



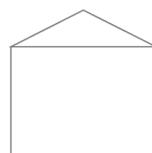
Silo



Horno



Torre de enfriamiento



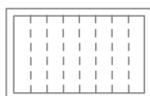
Tanque atmosférico



Tolva de pesaje



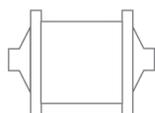
Tornillo alimentador



Precipitador electrostático



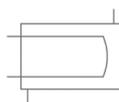
Mezclador



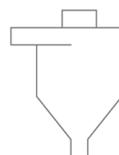
Molino



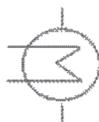
Alimentador rotativo



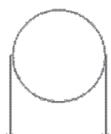
Evaporador



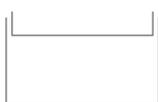
Separador ciclónico



Intercambiador de calor



Tanque presurizado



Tanque con techo flotante



Filtro de líquido



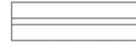
Banda transportadora



Compresor recíprocante



Separador rotativo



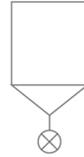
Acondicionador de flujo



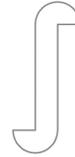
Trampa



Mezclador helicoidal



Filtro de mangas



Elevador



Tanque abierto



Tanque cilíndrico horizontal

BIBLIOGRAFÍA

ANSI/ISA S5.1-2009. Instrumentation Symbols and Identification, International Society of Automation.

ANSI/ISA S5.4-1991. Instrument Loop Diagrams, Instrument Society of America.

ANSI/ISA S20-1981. Specification Forms for Process Measurement and Control Instruments, Primary Elements and Control Valves, Instrument Society of America.

ISA TR20.00.01-2001. Specification Forms for Process Measurement and Control Instruments, Part I: General considerations The Instrumentation, Systems and Automation Society.

C.L., Albert - D.A., Coggan (1992). Fundamentals of Industrial Controls, Instrument Society of America.

Wade, Harold L. (1994). *Regulatory and advanced regulatory control: system development*. Instrument Society of America.

Smith, Carlos A.; Corripio, Armando B. (1991). *Control Automático de Procesos*. Editorial Limusa S.A.

Capítulo 4

MEDICIÓN DE TEMPERATURA



Glaciar Perito Moreno, provincia de Santa Cruz, El Calafate - Argentina

4.1. FUNDAMENTOS

4.1.1. Definición de temperatura

Temperatura es la medida de calor asociado con el movimiento de moléculas de una sustancia. La energía térmica siempre fluye desde un cuerpo caliente a un cuerpo frío. La temperatura es una propiedad intrínseca de la materia, que cuantifica la habilidad de un cuerpo para transferir energía térmica a otro cuerpo.

También se define como la magnitud física que mide qué tan caliente o tan frío se encuentra un objeto.

La temperatura mide la concentración de energía y es aquella propiedad física que permite asegurar si dos o más sistemas, están en equilibrio térmico o no.

4.1.2. Calor

Forma de energía que se transfiere por una diferencia de temperaturas.

4.1.3. Cero absoluto

Temperatura a la cual la energía térmica es mínima. Está definida como 0K (-273.15°C) o 0°R (-459.67°F).

4.1.4. Cuerpo negro

Un objeto que en teoría irradia la máxima cantidad de energía, a una temperatura dada y absorbe toda la energía incidente sobre él.

El cuerpo negro no necesariamente, tiene el color que lleva su nombre. El nombre de cuerpo negro fue seleccionado, porque el color negro se define como la absorción total de energía.

4.1.5. Caloría

Medida de la energía térmica definida como la cantidad de calor requerida, para incrementar un grado de temperatura, un gramo de agua a 1°C.

4.1.6. Punto de ebullición

La temperatura a la cual una sustancia en fase líquida se transforma en

fase gaseosa. Comúnmente es referida al punto de ebullición del agua 100°C (212°F).

4.1.7. Punto de congelación

La temperatura a la cual una sustancia pasa de fase líquida a fase sólida.

4.1.8. Radiación

El movimiento de energía en formas de ondas electromagnéticas.

4.1.9. Termometría

Ciencia de la medición de temperatura.

4.1.10. Termopozo

Es un tubo cerrado en un extremo y abierto en el otro, diseñado para proteger el elemento primario de temperatura de las condiciones difíciles de proceso como presión, humedad, gases corrosivos, etc.

4.2. ESCALAS DE TEMPERATURA

4.2.1. Escala Kelvin

La base de la medición de la temperatura, es la escala termodinámica de temperatura derivada de los principios de la termodinámica. La unidad de temperatura termodinámica es el Kelvin, unidad de temperatura del sistema internacional de unidades (SI).

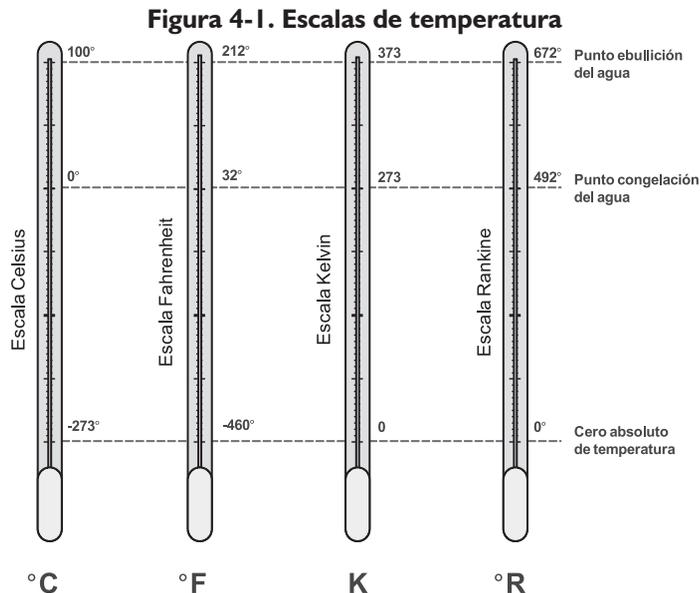
Un Kelvin corresponde a la fracción de $1/273.16$, de la temperatura termodinámica del punto triple del agua. El punto triple del agua es alcanzado cuando el hielo, el agua y el vapor de agua, están en equilibrio.

4.2.2. Escala Celsius

Es la escala de temperatura, comprendida entre el punto de congelación del agua a 0°C y el punto de ebullición a 100°C .

4.2.3. Escala Fahrenheit

La escala de temperatura Fahrenheit se define como el intervalo comprendido entre el punto de congelación del agua a 32° y el punto de ebullición a 212° .



4.2.4. Escala Rankine

Esta escala es equivalente a la escala termodinámica Kelvin, pero expresada en grados Fahrenheit. La temperatura de punto triple del agua que en la escala Kelvin corresponde a 273.16 K, en esta escala corresponde a 491.69°R.

4.2.5. Conversión de unidades

Tabla 4-I. Conversión unidades de temperatura

De ^a	Celsius	Kelvin	Fahrenheit	Rankine
Celsius	1	$^{\circ}\text{C} + 273.15$	$(^{\circ}\text{C} \times 1.8) + 32$	$(^{\circ}\text{C} + 273.15) \times 1.8$
Kelvin	$^{\circ}\text{K} - 273.15$	1		$^{\circ}\text{K} \times 1.8$
Fahrenheit	$\left(\frac{^{\circ}\text{F} - 32}{1.8}\right)$	$\left(\frac{^{\circ}\text{F} - 32}{1.8}\right) + 273.15$	1	$^{\circ}\text{F} + 459.67$
Rankine		$\frac{^{\circ}\text{R}}{1.8}$	$^{\circ}\text{R} - 459.67$	1

4.3. FORMAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

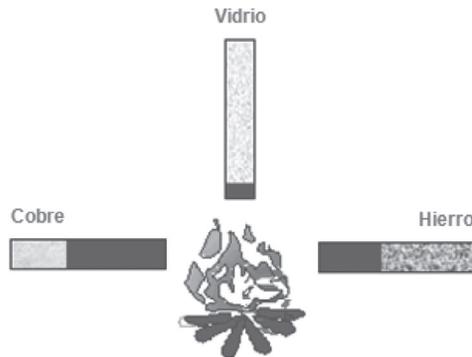
Transferencia de calor es un proceso por el cual se intercambia energía en forma de calor, entre distintos cuerpos, que se encuentran a diferentes temperaturas. El calor se transfiere de tres formas: por conducción, por convección y por radiación.

4.3.1. Conducción

Esta forma de transferencia de calor, opera como actividad atómica o molecular; cuando más cerca se encuentren las moléculas, mayor será la conductividad como es el caso de los metales, que conducen mejor el calor que el aire. La conducción se puede controlar por medio de materiales menos conductores y mediante estructuras discontinuas como el vidrio, fibras o materiales aislantes.

En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite desde el extremo que está siendo calentado, hasta el extremo más frío por conducción.

Figura 4-2. Transferencia de calor por conducción



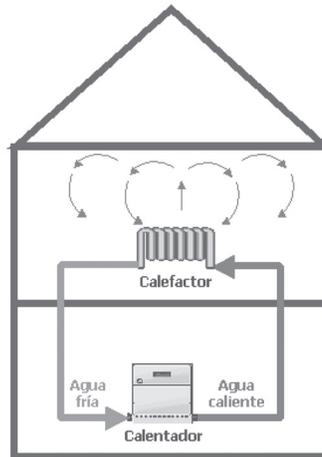
4.3.2. Convección

La transferencia de calor por convección opera por el flujo natural de los gases o líquidos, causado por los cambios de densidad, que se presentan con la diferencia de temperaturas.

El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad tiende a disminuir. El fluido más caliente y me-

nos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural. La transferencia de calor por conducción se puede acelerar usando medios mecánicos como un ventilador o una turbina. En este caso la transferencia de calor se denomina convección forzada.

Figura 4-3. Transferencia de calor por convección



4.3.3. Radiación

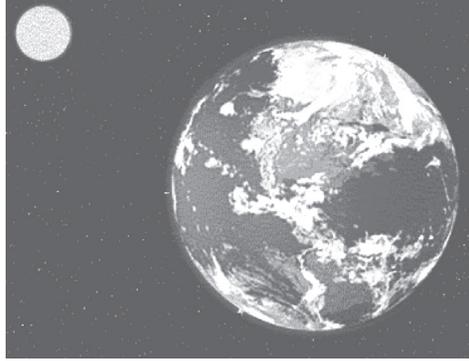
La radiación presenta una diferencia fundamental, respecto a la transferencia de calor por conducción y la convección. Las sustancias que intercambian calor por radiación no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas, sin que exista un medio de propagación entre ellas.

La propagación del calor por radiación es semejante a la propagación de la luz, de los rayos X, de los rayos gama, etc. Se trata de la propagación de ondas electromagnéticas.

La radiación térmica consta de ondas electromagnéticas emitidas por sólidos, líquidos o gases, dependiendo de la temperatura a la que se encuentren. Al mismo tiempo, estos mismos cuerpos absorben energía que otros emiten.

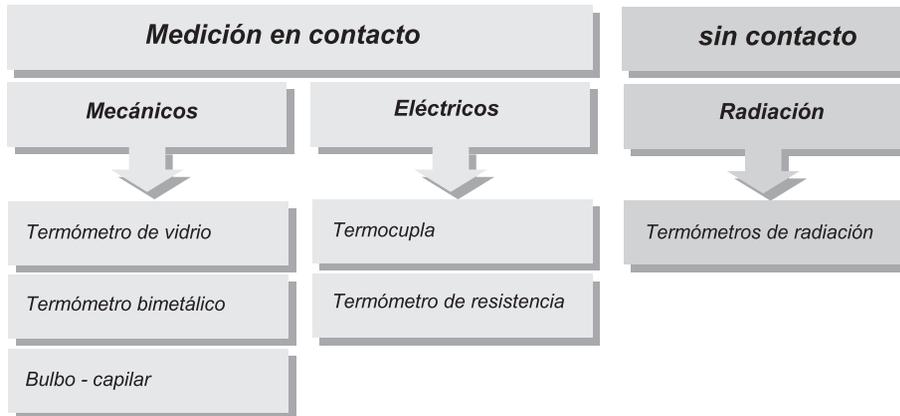
Todos sabemos que el sol calienta la tierra y que el calor que proviene de este astro, no se propaga ni por conducción ni por convección, debido al vacío de millones de kilómetros que existe entre nuestro planeta y el sol.

Figura 4-4. Transferencia de calor por radiación



4.4. RESUMEN MEDIDORES DE TEMPERATURA

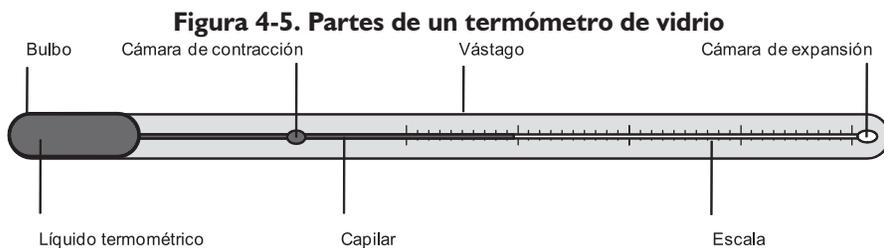
Tabla 4-2. Resumen medidores de temperatura



4.5. TERMÓMETROS DE VIDRIO

El funcionamiento del termómetro de vidrio se basa en el principio que los líquidos se expanden cuando son sometidos a un incremento de temperatura.

El líquido termométrico es almacenado en el bulbo que se encuentra conectado a un capilar integrado en el vástago del instrumento. Cuando la temperatura del proceso aumenta, el líquido se expande y produce un incremento de volumen. Este incremento genera un aumento en la altura del líquido termométrico dentro del capilar. La temperatura es medida comparando la altura del líquido con la escala grabada sobre el cuerpo del instrumento.



El bulbo sirve como recipiente del líquido y es el elemento sometido a los cambios de temperatura. El vástago es un tubo de vidrio que contiene en su interior el capilar. El capilar es un tubo delgado, por el cual el líquido sube y baja. La escala consta de una serie de marcas usadas para medir temperatura. La escala puede estar marcada de forma permanente en el termómetro o puede ser una pieza independiente, marcada en grados normalmente en escala Celsius o Fahrenheit.

El funcionamiento de un termómetro de vidrio, se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$V_t = V_o(1 + \beta.t)$$

Donde:

V_t : Volumen de líquido a temperatura t .

V_o : Volumen de líquido a 0°C .

β : Coeficiente dilatación del líquido.

t : Temperatura del líquido en $^\circ\text{C}$.

Ecuación 4-1. Termómetros de vidrio.

Un termómetro de vidrio de precisión, incluye una cámara de expansión y otra de contracción. La cámara de contracción está localizada entre el bulbo y la escala. Esta cámara incrementa el volumen del capilar y previene una contracción total del líquido a bajas temperaturas. La cámara de expansión está localizada en la parte superior de la escala con el fin de contener el fluido a altas temperaturas, si este llegara a sobrepasar el valor superior de la escala. Sin esta cámara el tubo capilar se llenaría y se presionaría, causando la rotura del tubo de vidrio. Es importante tener en cuenta, que ninguna de las cámaras es efectiva a temperaturas extremadamente altas o bajas.

En algunos casos encima del líquido termométrico, dentro del capilar se adiciona un relleno de gas protector sometido a mayor presión (normalmente nitrógeno), para permitir la medición a más altas temperaturas.

Tabla 4-3. Líquidos usados en termómetros de vidrio

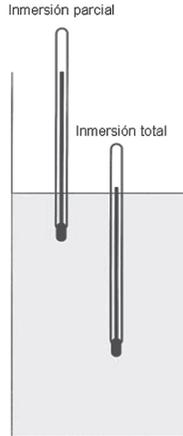
Líquido termométrico	Rango de temperatura
Mercurio	-39 a 280°C
Pentano	-200 a 20°C
Alcohol etílico	-110 a 70°C
Alcohol metílico	-80 a 60°C
Tolueno	-70 a 100°C
Acetona	-80 a 50°C
Toluol	-90 a 100°C
Mercurio Thalium	-58 a 100°C

El líquido más usado en los termómetros de vidrio es el mercurio, pero su uso está limitado en el rango inferior a -39°C (punto de fusión del mercurio). Por esta razón en los rangos bajos de temperaturas se usan otros líquidos como alcohol, tolueno o pentano.

La indicación de un termómetro de líquido, además de la temperatura del bulbo también depende de la temperatura de la columna. Por eso al utilizar un termómetro de vidrio hay que tener especial cuidado con la profundidad de inmersión.

Existen dos tipos de termómetros de vidrio: de inmersión parcial y de inmersión total. El termómetro de inmersión parcial es sumergido a un punto fijo, indicado en el cuerpo de vidrio por medio de un anillo.

Figura 4-6. Termómetros de inmersión parcial y total



El termómetro de inmersión total es sumergido a la altura de la columna de líquido. Debido a esto, los termómetros de inmersión total usualmente no tienen el anillo que indica el punto de inmersión.

Los termómetros de vidrio pueden leerse directamente, son muy precisos y estables cuando se usan apropiadamente. Por ello son usados con frecuencia en laboratorios para monitorear baños de líquido o como patrones de calibración de otros sensores de temperatura.

La precisión del termómetro depende de su construcción, uso, calibración y número de divisiones en la escala.

La máxima precisión de un termómetro de vidrio es de 0.01°C para temperaturas bajas entre $0-150^{\circ}\text{C}$ y 1°C para temperaturas entre $300-500^{\circ}\text{C}$. En el caso de los termómetros de inmersión parcial, la precisión máxima es de 0.1°C para bajas temperaturas ($0-150^{\circ}\text{C}$) y 2°C para termómetros de altas temperaturas ($300-500^{\circ}\text{C}$).

Resumen termómetros de vidrio

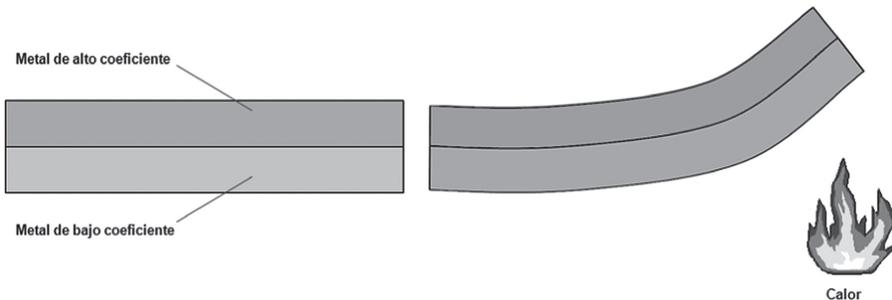
Ventajas
Bajo costo
Medición simple
Larga vida
Preciso
Desventajas
Difícil de leer
Medición local
Precisión
+/- 0.01% a +/- 2%
Rango de medición
-120 a 320°C , Rango extendido: -200 a 600°C

4.6. TERMÓMETROS BIMETÁLICOS

El termómetro bimetalico se basa en el principio que los metales presentan una expansión térmica por efecto de la temperatura y que los coeficientes de expansión no son los mismos para todos los metales.

El elemento bimetalico está conformado de una tira compuesta por dos metales que tienen diferentes coeficientes de expansión, soldados entre sí en forma de cantilever. Cuando la temperatura incrementa, causa que los dos metales se curven. Esto es ocasionado porque el metal de mayor coeficiente de temperatura se expande más que el otro metal.

Figura 4-7. Termómetros bimetalicos



La siguiente fórmula relaciona la expansión térmica de los metales por efecto de la temperatura:

$$l = l_0(\alpha \times \Delta t)$$

Donde:

l : Longitud del material, después de ser calentado.

l_0 : Longitud original del material.

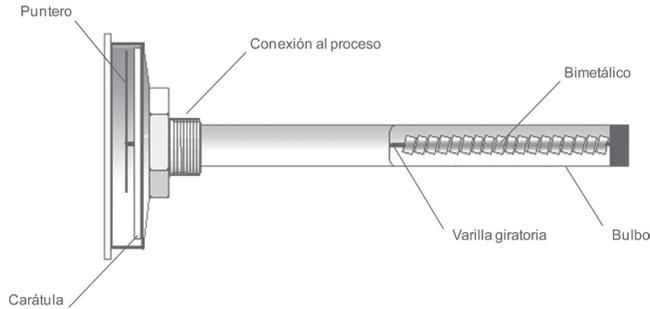
α : Coeficiente de expansión lineal.

Δt : Cambio de temperatura.

Ecuación 4-2. Expansión térmica en los metales.

Para amplificar el movimiento de deflexión, el elemento bimetalico se construye generalmente como un elemento helicoidal (ver figura 4-8). Con esta configuración el elemento bimetalico es más robusto y menos sensible a la vibración.

Figura 4-8. Partes de un termómetro bimetalico



El elemento bimetalico se construye con un metal de bajo coeficiente de expansión y otro de alto coeficiente de expansión. Las parejas de metales usadas normalmente son: hierro-níquel, latón-monel, zinc-latón, níquel-invar (64% hierro- 36% níquel) o acero inoxidable-invar.

Los termómetros bimetalicos pueden ser fabricados en rangos de -180°C hasta 500°C . Sin embargo, a bajas temperaturas la rata de deflexión se reduce rápidamente, mientras que en rangos cercanos a 500°C , los sensores no tienen gran estabilidad de temperatura.

Usualmente los termómetros bimetalicos no se recomiendan para uso continuo por encima de 450°C .

Resumen termómetros bimetalicos

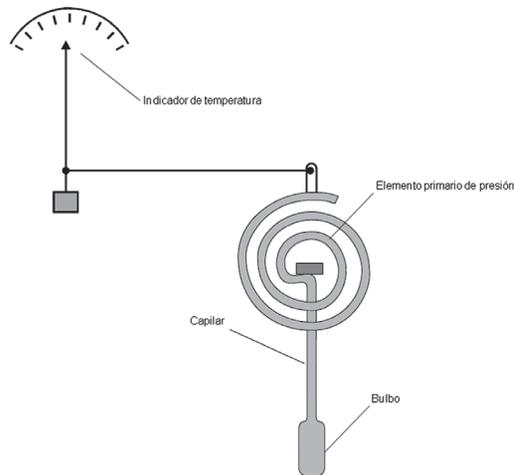
Ventajas
Más robustos que los termómetros de vidrio
Menor costo que el térmico o eléctrico
Desventajas
Precisión limitada
Se descalibran con el manejo brusco
Solo es posible su uso, para lectura local
Precisión
+/- 0.5% a +/- 1% del span
Rango de medición
-65 a 420°C . rango extendido:-75 a 540°C

4.7. TERMÓMETROS DE RELLENO TÉRMICO (BULBO-CAPILAR)

El termómetro de relleno térmico o bulbo-capilar está diseñado para indicar o registrar la temperatura del punto de medición.

El bulbo que es el elemento sensible contiene un fluido que cambia sus características por efecto de la temperatura. El fluido dentro del capilar aumenta su volumen por el efecto del aumento de temperatura del proceso, y esto ocasiona un aumento de presión. El elemento primario instalado en el equipo receptor responde a estos cambios de presión. Los movimientos del elemento primario son amplificados y acoplados a un puntero o a una plumilla de un registrador. El movimiento angular es usado en los termómetros de carátula para indicación local.

Figura 4-9. Partes de un termómetro de bulbo-capilar



Los termómetros de relleno térmico se dividen en grupos dependiendo del fluido usado (ver tabla 4-4). En el grupo I se agrupan los termómetros que usan líquidos diferentes a mercurio. En el grupo II, los equipos que usan vapor como fluido de relleno. En el grupo III, los termómetros que usan gas y en el grupo V, el líquido de relleno es mercurio. El mercurio por ser altamente contaminante y cancerígeno se está limitando en las aplicaciones de medición en la industria.

Esta clasificación de acuerdo a SAMA (Scientific Apparatus Markers Association), no incluye el grupo IV. Por esta razón y la limitación en el uso del mercurio en algunas publicaciones técnicas solamente mencionan los equipos de los grupos I, II y III.

4.7.1. Termómetros rellenos de líquido y mercurio

Ambos tipos de termómetros operan basados en el principio de expansión térmica de los líquidos, de forma semejante a como funciona el termómetro de vidrio. Los líquidos usados como líquido de relleno, son principalmente xileno, alcohol y éter.

Otro líquido comúnmente usado es el mercurio. Los termómetros con relleno de mercurio se consideran una clase separada, porque el mercurio tiene características únicas que ofrecen muchas ventajas sobre los otros líquidos. Por ejemplo, el mercurio responde rápidamente a los cambios de temperatura y el termómetro con relleno de mercurio, tiene mejor precisión que los de relleno con otros líquidos.

4.7.2. Termómetros rellenos de gas

Este tipo de termómetro depende del incremento de la presión de un gas confinado (volumen constante de un gas bajo presión).

El nitrógeno es el gas más frecuentemente usado, porque es químicamente inerte y posee un coeficiente de expansión térmica favorable.

Excepto por el tamaño del bulbo, el sistema de relleno de gas es idéntico al de relleno de líquido. El bulbo del sistema de relleno de gas, debe ser más grande y su volumen debe ser considerablemente mayor que el resto de los sistemas de relleno térmico. Con el tamaño del instrumento se compensan los errores, debido a las variaciones de la temperatura ambiente.

4.7.3. Termómetros rellenos de vapor

En este termómetro, todo el sistema está prácticamente relleno de líquido. El líquido se expande y con el cambio de temperatura, la presión de vapor incrementa. A bajas temperaturas el cambio en la presión de vapor es muy

bajo, pero a altas temperaturas el cambio de presión es significativo.

En los sistemas de relleno de vapor, cuando la temperatura del bulbo es menor que la del resto del sistema, el líquido permanece en el bulbo y el vapor ocupa el capilar y el elemento primario. Cuando la temperatura del bulbo es mayor que la del resto del sistema, el líquido y el vapor cambian de sitio; el bulbo ahora contiene vapor y el elemento primario se encuentra relleno de líquido. De esta forma la temperatura del bulbo, siempre se mantiene por debajo o por encima de la temperatura del resto del sistema.

El sistema de relleno de vapor se divide en cuatro clases: Clase IIA, IIB, IIC y IID.

El sistema de clase IIA está diseñado para operar con una temperatura de proceso mayor que la del resto del sistema. La temperatura del proceso vaporiza el líquido volátil y este se condensa en el capilar y en el elemento primario.

El sistema de clase IIB está diseñado para operar con la temperatura del proceso menor que el resto del sistema. En este caso el capilar y el elemento primario están rellenos de vapor.

El sistema de clase IIC está diseñado para medir temperaturas mayores o menores que la temperatura del sistema. Cuando la temperatura del bulbo es menor que la del resto del sistema, el bulbo se llenará de líquido, y el capilar y elemento primario contendrán vapor. Cuando la temperatura del bulbo es mayor que la del resto del sistema, el bulbo se llenará de vapor y el elemento primario estará lleno de líquido.

En el sistema de clase IIC los límites de medición del termómetro se entrecruzan con la temperatura ambiente. Esto provoca que el capilar deba llenarse con líquido o con vapor, lo cual da como resultado errores en la carga estática a menos que el bulbo se monte al mismo nivel que el recipiente. Debido a este efecto, este sistema se usa exclusivamente para temperaturas por encima o por debajo de la temperatura ambiente.

El sistema de clase IID está diseñado para reducir el efecto de la temperatura ambiente usando un segundo líquido no volátil. En este caso el capilar y tubo Bourdon permanecen llenos de líquido no volátil. Este líquido transmite los cambios de presión hidráulicamente al tubo elemento primario de presión.

Tabla 4-4. Clasificación termómetros de bulbo-capilar

Clase	Fluido relleno	Características	Fluido usado
I	Líquido diferente al Mercurio	Sin compensación	Alcohol y éter en forma líquida
IA		Indicador y capilar compensados	
IB		Indicador compensado	
IIA	Vapor	Temperatura del bulbo > que la temperatura ambiente.	Cloruro de metilo, éter, benceno, tolueno, butano, propano, hexano en forma de vapor
IIB		Temperatura del bulbo < que la temperatura ambiente.	
IIC		Temperatura de bulbo > < que la temperatura ambiente, Uso de bulbo grande	
IID		Temperatura de bulbo > < que la temperatura ambiente, uso de líquido no volátil como líquido de transmisión.	
IIIA	Gas	Indicador y capilar compensados	Helio, Nitrógeno, Anhídrido Carbónico en forma de gas.
IIIB		Indicador compensado	
VA	Mercurio	Indicador y capilar compensados	Mercurio
VB		Indicador compensado	

4.7.4. Compensación de temperatura ambiente

La compensación de temperatura ambiente en los termómetros de bulbo-capilar se realiza de diferentes formas. La primera de ellas consiste en mantener una relación muy grande entre el volumen del líquido contenido en el bulbo y el volumen de líquido contenido en el capilar y elemento primario (100:1). De esta forma los errores por cambios de temperatura ambiente, serían muy pequeños. Sin embargo, esto obligaría a construir el bulbo demasiado grande.

La compensación de la expansión del líquido termométrico por cambios de la temperatura ambiente se realiza usando un elemento bimetálico u otro segundo elemento primario en el receptor. En esta configuración, los cambios de temperatura ambiente del elemento receptor, no producirán cambios en la indicación del termómetro.

La compensación del líquido termométrico y el elemento receptor, se completa usando una compensación volumétrica. La compensación volumétrica se logra usando un alambre delgado en el capilar. El alambre y el capilar

están fabricados de diferentes materiales. Un incremento de temperatura a lo largo del capilar, causa que el líquido y el alambre se expandan. La expansión del líquido debe ser compensada, de tal forma que la expansión neta del sistema sea despreciable. De esta forma los cambios en la temperatura ambiente sobre el capilar, no afectan la operación del equipo.

La compensación de temperatura ambiente puede ser requerida en los termómetros de rellenos de gas, al igual que los termómetros rellenos de líquido. El error debido a los cambios de temperatura, depende del rango del instrumento y el volumen neto del bulbo, capilar y elemento receptor.

Generalmente los termómetros rellenos de nitrógeno no requieren compensación, pero para algunas aplicaciones la compensación puede ser requerida. Esta puede ser realizada solamente en el elemento receptor, usando un elemento bimetálico o un segundo elemento espiral o helicoidal.

Con los sistemas rellenos de vapor no se requiere compensación de temperatura ambiente, porque la presión del sistema solamente es afectada por la superficie libre en el líquido (bulbo). Los cambios de temperatura en cualquier lugar del sistema causan contracción o expansión del volumen, pero es automáticamente compensado, estableciendo un nuevo equilibrio en la presión de vapor de líquido y manteniendo una presión constante.

Resumen termómetros de bulbo-capilar

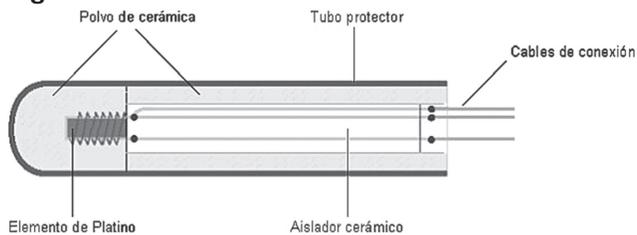
Ventajas
Principio de medición simple
No requiere energía auxiliar
Excelente tiempo de respuesta
Costo relativamente bajo
Desventajas
Tamaño del bulbo, mayor que los termómetros eléctricos
Rango de temperatura limitado, comparado con los termómetros eléctricos
Distancia limitada entre bulbo y capilar (no recomendable por encima de 15 m)
Precisión
+/- 0.5% a +/- 2% del span
Rango de medición
-185 a 540°C, rango extendido: -265 a 760°C

4.8. TERMÓMETROS DE RESISTENCIA O RTD

Los termómetros de resistencia están basados en el principio que la resistencia de un alambre fabricado de un metal puro, incrementa por efecto de la temperatura. Los sensores prácticos están fabricados de metales que tienen un gran coeficiente de resistividad, debido a los cambios de temperatura.

El elemento de medición está compuesto por un devanado de alambre, soportado con un aislador como vidrio, mica o cerámica e instalado en un tubo protector de acero inoxidable.

Figura 4-10. Partes de un termómetro de resistencia



Todos los metales son materiales conductores y como la resistencia es inversa a la conductividad, esa propiedad es aprovechada para fabricar RTDs. Cada metal tiene una resistencia específica y única, que puede determinarse experimentalmente. Esta resistencia R , es proporcional a la longitud del conductor L , e inversamente proporcional a su sección transversal A .

$$R = r \times \frac{L}{A}$$

Donde:

r : Resistividad en Ohmios.

L : Longitud del conductor.

A : Sección transversal del conductor.

Ecuación 4-3. Termómetros de resistencia.

Los termómetros de resistencia están fabricados de materiales que incrementan su resistencia cuando aumenta la temperatura. En teoría, cualquier metal podría ser usado para medir temperatura. El metal debe seleccionarse, por su alto punto de ebullición y la habilidad para soportar el efecto de la co-

rosión. Entre las condiciones deseables se incluyen la estabilidad química, su disponibilidad en forma pura y las propiedades eléctricas que sean altamente reproducibles.

El mejor material para fabricar RTDs es el platino porque tiene una alta resistividad, es muy estable y no reacciona con las condiciones de la atmósfera a la cual está expuesto. El platino es costoso y el proceso para convertir el metal en alambre fino, en los primeros años fue muy complejo. Como consecuencia de esto, las RTDs comenzaron a fabricarse con otros metales como cobre, níquel y aleaciones níquel-hierro.

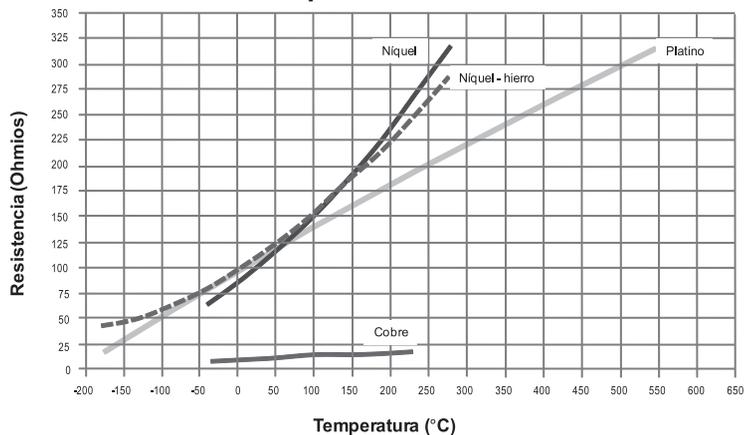
Tabla 4-5. Resistividad de los metales

Metal	Símbolo	Resistividad
Oro	Au	13.00
Plata	Ag	8.8
Cobre	Cu	9.26
Platino	Pt	59.00
Tungsteno	W	30.00
Níquel	Ni	36.00

Todos estos metales tiene coeficiente positivo de resistencia, pero cada uno tiene diferentes características. Los coeficientes de resistividad, magnitud y linealidad son diferentes en cada metal con los que se fabrican las RTDs.

El cobre es el más lineal, pero tiene el inconveniente de su baja resistividad. Es ampliamente usado en motores y generadores para medir la temperatura de los devanados.

Figura 4-11. Comparación curvas de los metales usados para fabricar RTDs



La RTD de níquel y aleación de níquel-hierro fueron usadas por sus altos coeficientes de temperatura y porque su alambre era más fácil de trabajar y más económico que el platino. El uso de la RTD de níquel se ha disminuido en los últimos años, por la dificultad de producirlo con altos grados de pureza.

A pesar que el níquel y sus aleaciones tienen alta resistividad, no son rivales en la actualidad para la RTD de platino.

Las RTDs comunes están construidas de platino, níquel y aleaciones de cobre. Las RTDs de oro y plata son raramente usadas, debido a su elevado costo. El tungsteno tiene resistencia relativamente alta, pero solo se usa en altas temperaturas, teniendo en cuenta que es quebradizo y difícil para trabajar. El cobre se usa ocasionalmente, porque es lineal, de bajo costo, pero solo cubre un rango hasta 120°C.

Tabla 4-6. Materiales usados para fabricación de termómetros de resistencia

Material	Coefficiente Temp. (α)	Rango Temp.	Descripción	Aplicaciones
Platino	0.003850 0.003923	-269 a 593° C	Es la RTD más precisa y estable. La curva de resistencia vs. temperatura es casi lineal. Muy alta resistividad.	Es la más usada en aplicaciones industriales, en laboratorio y medición de temperaturas críticas.
Níquel	0.0067	-40 a 300° C	Tiene el más alto coeficiente de temperatura.	Fue usado en barcos viejos de la Armada y antiguos controles de temperatura.
Cobre	0.0043	-73 a 149° C	La más lineal, pero de rango limitado. Tiene muy baja resistividad. Requiere grandes longitudes de cable para producir un sensor aceptable.	Usado en motores y generadores eléctricos pero raramente usado en aplicaciones industriales.

El grado de pureza del platino afecta el coeficiente de temperatura de la RTD (α), que es la pendiente del sensor de 0°C a 100°C y es calculado por la siguiente fórmula:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 - R_0}$$

Donde:

α : Coeficiente de temperatura ($\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$).

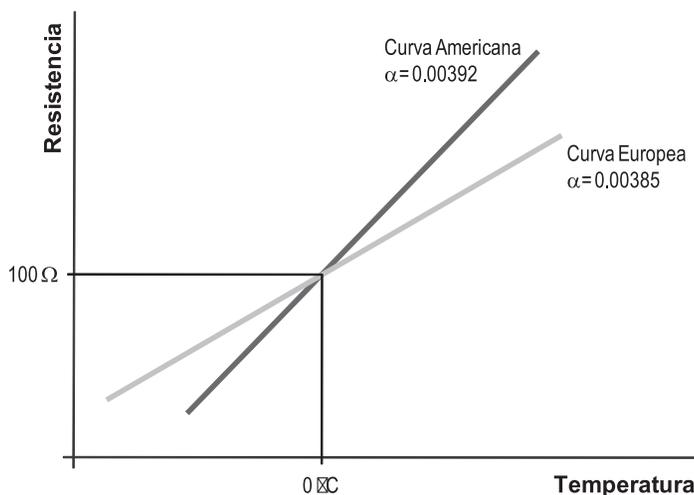
R_{100} : Resistencia a 100°C.

R_0 : Resistencia a 0°C.

Ecuación 4-4. Cálculo coeficiente de temperatura de los termómetros de resistencia.

Las RTDs de platino pueden ser fabricadas con platino de alta pureza o con platino grado IEC/DIN. La diferencia radica en el porcentaje de platino con el que se fabrican los alambres. En la norma IEC/DIN, el platino puro es intencionalmente contaminado con otro grupo de metales. Para el caso del platino de alta pureza, el contenido de platino es de 99,999%. El platino de la norma IEC/DIN produce un coeficiente de temperatura α de 0.00385, mientras el platino de alta pureza produce un coeficiente α de 0.003926.

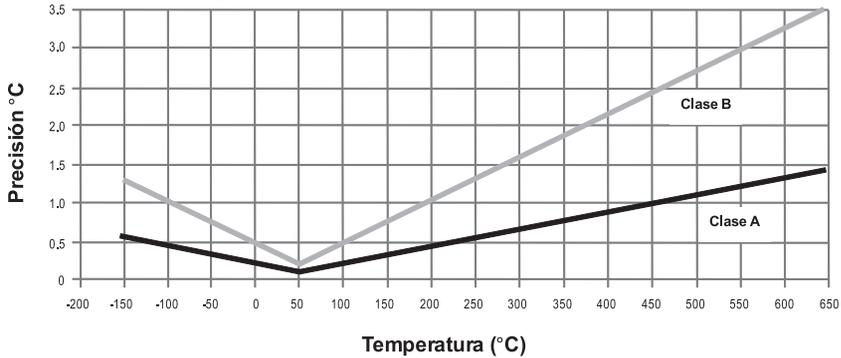
Figura 4-12. Normas de fabricación de las PT 100



La precisión de una RTD de platino está especificada por las normas IEC publicación 751. La norma especifica dos clases:

La clase A es considerada la de más alta precisión y tiene una tolerancia a 0°C de $\pm 0.06 \Omega$. La clase B tiene la precisión estándar y tiene una tolerancia a 0°C de $\pm 0.12 \Omega$. La clase B es la más usada en aplicaciones industriales. Las RTDs de clase A son usadas principalmente en plantas de alimentos y bebidas y en industria farmacéutica.

Figura 4-13. Clase de precisión en las PT 100



La precisión de una RTD de acuerdo a la IEC 751, se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\text{Clase A: } \Delta t = \pm (0.15 + 0.002 \times |t|)$$

$$\text{Clase B: } \Delta t = \pm (0.30 + 0.005 \times |t|)$$

Donde:

t : Valor absoluto de temperatura en °C.

Ecuación 4-5. Clase de precisión de las PT 100.

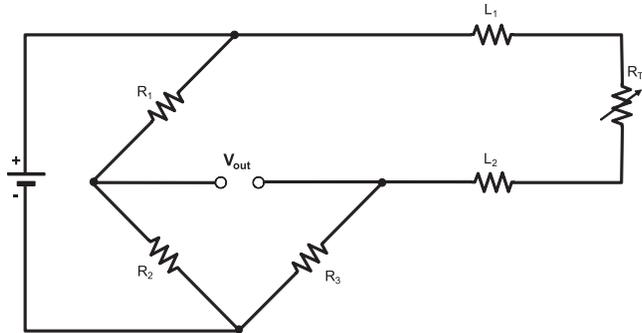
La RTD de clase A es aplicada a temperatura entre -200 y 650°C y solo pueden ser aceptadas para configuraciones de 3 y 4 hilos. La RTD de clase B, cubre el rango completo de -200 a 850°C.

La medición de temperatura con RTDs, se logra midiendo la resistencia del sensor y usando la tabla de referencia para convertirla en temperatura. Esto se logra conectando la RTD en un puente de Wheatstone. El puente actúa en modo desbalanceado. En este caso tres resistencias son fijas y la RTD se comporta como resistencia variable. Un cambio de resistencia en el sensor, causa un cambio proporcional en el voltaje de salida. El voltaje de salida V_{out} es convertido a temperatura, que corresponde a la resistencia del sensor.

Los termómetros de resistencia normalmente están instalados de forma separada del equipo indicador de temperatura. Los cables que transmiten la señal de la RTD al instrumento de medición, adicionan resistencias en serie al circuito de la RTD. A grandes distancias, la resistencia del cable de cobre

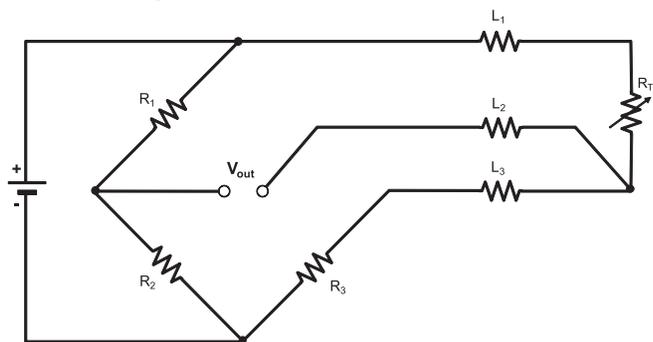
puede ser muy grande comparada con la del sensor, generando error en la medición.

Figura 4-14. Conexión RTD 2 hilos



La configuración de 2 hilos no permite compensar los errores debido a la longitud del cable. Sin embargo, si el indicador está cerca la RTD y los tramos de cables son cortos, la conexión de 2 hilos puede ser usada, teniendo en cuenta el error que puede generarse.

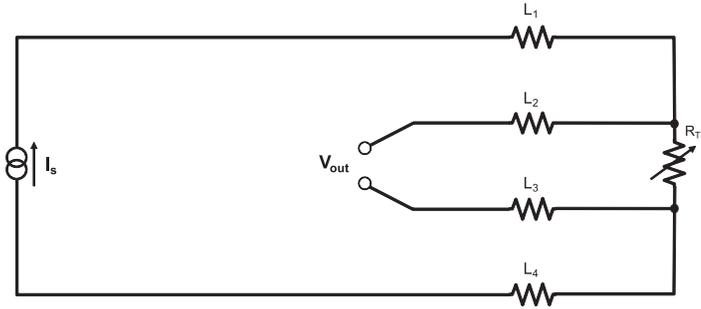
Figura 4-15. Conexión RTD 3 hilos



La configuración de 3 hilos es la más usada para aplicaciones industriales. Cuando se usa correctamente se eliminan las resistencias en serie, debido a la longitud del cable y permite una medición con buena precisión.

El código de colores usado para la configuración de 3 hilos, típicamente tiene dos cables de color rojo y un cable de color blanco.

Figura 4-16. Conexión RTD 4 hilos

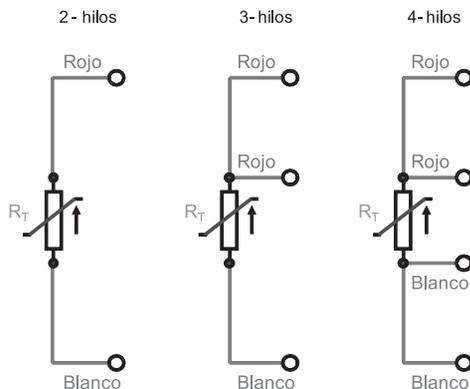


La forma más efectiva de eliminar el efecto de la resistencia del cable es la configuración de 4 hilos.

Este tipo de configuración es usado principalmente en aplicaciones de laboratorios y para compensación interna de temperatura en medidores de alta precisión, pero no es muy frecuente su uso en aplicaciones industriales. Este tipo de configuración no requiere un circuito en puente. En su lugar se usa una fuente de alimentación de corriente constante conectada a través de L1 y L4. La caída de tensión a través de la RTD es medida en L2 y L3. Así la caída de tensión es independiente del efecto de la resistencia en el cable.

El código de colores usado para la configuración de 4 hilos, típicamente tiene dos cables de color rojo y dos cables de color blanco.

Figura 4-17. Código colores RTDs de 2, 3 y 4 hilos



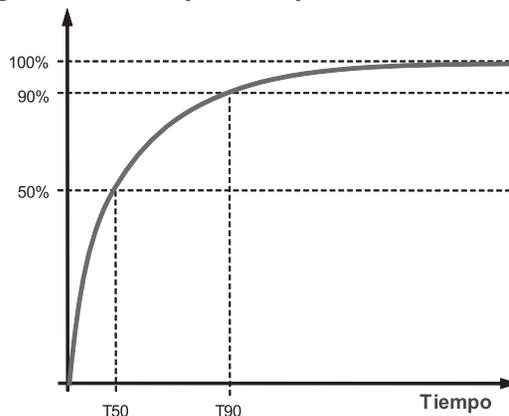
Otro parámetro importante para la selección de una RTD es el tiempo de respuesta. El tiempo de respuesta es la habilidad para reaccionar a los

cambios de temperatura en el proceso, dependiendo de la masa térmica del sensor y la proximidad al proceso. Los sensores de inmersión directa tienen tiempos de respuesta más rápidos, pero en muchas aplicaciones es necesario instalar un termopozo para proteger el sensor y permitir su reemplazo sin necesidad de parar el proceso.

El tiempo de respuesta de la RTD con termopozo es más lento, debido a la masa térmica y la distancia entre la punta del sensor y las paredes del termopozo. Los fabricantes de RTDs pueden mejorar los tiempos de respuesta, ajustando mejor la tolerancia entre la punta del sensor y las paredes del termopozo o usando algún material de relleno como grasa térmica. En algunas aplicaciones donde se requiere un tiempo de respuesta muy rápido, es frecuente encontrar el termopozo con la punta que está en contacto con el proceso, con un diámetro menor o adelgazada.

Otros factores en el sistema, que pueden afectar el tiempo de respuesta del sensor son: la longitud de inmersión del sensor, la velocidad del fluido, inercia térmica de la pared del tanque o tubería y la influencia de la temperatura ambiente por conducción o convección.

Figura 4-18. Tiempo de respuesta de una PT 100



Las normas industriales definen el tiempo de respuesta T , como el tiempo requerido por el sensor para reaccionar a un cambio de escalón de temperatura con relación a un cambio de resistencia correspondiente al porcentaje especificado en cada paso. De acuerdo a la norma IEC 751, los valores de

escalón son T50 y T90 y se calculan haciendo pasar por el sensor un flujo de agua de 0.4 m/s.

Resumen termómetros de resistencia

Ventajas

- Buena estabilidad y repetibilidad
- Más precisos y lineales que las termocuplas
- No requieren referencia de temperatura

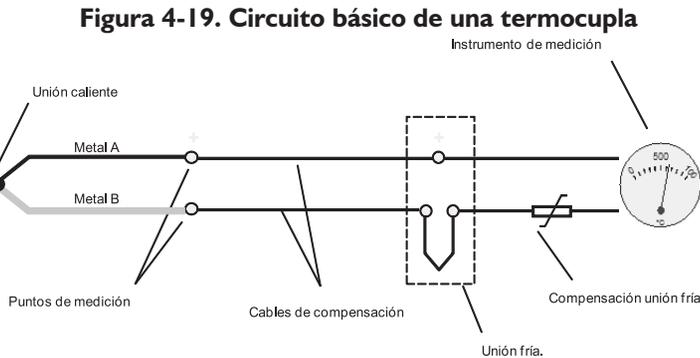
Desventajas

- Costo alto
- Menos robustas que las termocuplas
- Pequeño cambio de resistencia
- Rango limitado de temperatura

4.9. TERMOCUPLAS O TERMOPARES

Una termocupla es un transductor que convierte energía térmica en energía eléctrica.

En su forma más simple una termocupla consiste en dos alambres, cada uno fabricado de un metal o aleación homogénea. Los alambres están unidos en un extremo, formando una junta o unión de medición (unión caliente). Esta junta de medición está expuesta al fluido o medio que va a ser medido. Los otros extremos de los alambres, normalmente están conectados a los terminales de un instrumento de medición, donde se forma una unión de referencia (unión fría).



Cuando las dos uniones están a diferentes temperaturas, una corriente fluye en el circuito. El voltaje que resulta del flujo de corriente, es medido para determinar la temperatura en la unión caliente.

4.9.1. Efectos termoeléctricos

Las termocuplas basan su funcionamiento en los efectos Seebeck, Peltier, Thomson.

4.9.1.1. Efecto Seebeck

El principio de la termocupla fue descubierto por Thomas Seebeck en 1821. Seebeck descubrió que una corriente fluye cuando dos alambres de diferentes metales están unidos, de forma que al menos dos uniones están a diferentes temperaturas. Este fenómeno es llamado efecto Seebeck y es la base con la que se diseñan las termocuplas.

4.9.1.2. Efecto Peltier

De manera contraria al efecto Seebeck, si una corriente fluye a través de la unión de dos metales diferentes que están a la misma temperatura, se libera o absorbe calor, dependiendo de la dirección de flujo de corriente. Si la corriente fluye en la misma dirección que la del efecto Seebeck, se libera calor en la unión caliente y se absorbe calor en la unión fría.

4.9.1.3. Efecto Thomson

El efecto Thomson resulta cuando una corriente eléctrica pasa a través de un conductor, en el cual hay un gradiente de temperatura y dicho material absorbe o libera energía. El efecto es reversible, con relación a la dirección de la corriente. El coeficiente Thomson también depende del material y la temperatura.

La forma útil de usar las termocuplas es midiendo tensión que aparece en los extremos abiertos, los cuales se mantienen a una temperatura constante y conocida. En los extremos abiertos aparece una fuerza electromotriz o termo-tensión, si entre las dos uniones existe una diferencia de temperatura.

La unión fría o de referencia debe mantenerse constante o a una temperatura de referencia. En muchos casos la unión de referencia es mantenida a 0°C (punto de congelación del agua), la cual permite que la temperatura del proceso sea leída directamente del indicador, sin necesidad de corrección. En ajustes de laboratorio, la temperatura de referencia a 0°C, puede ser mantenida usando un baño de hielo.

En aplicaciones industriales, sistemas de refrigeración son usados para mantener una temperatura estable, en los puntos de conexión de la unión fría.

Cuando las termocuplas se instalan en procesos industriales, la unión de medición puede estar distante cientos de metros del instrumento indicador, donde la unión de referencia está localizada. Es estos casos, el instrumento receptor en el cuarto de control debe realizar la medición y compensación de la temperatura ambiente de la unión fría.

Los cables de extensión no se fabrican de metales puros o aleaciones, con los mismos materiales con los que se fabrican las termocuplas por ser muy costosos. Los cables de extensión usados son compensados.

Cuando se usan apropiadamente los cables de extensión, la unión de referencia es transferida al punto donde el cable de compensación es conectado

al indicador. Sin embargo, en la conexión del cable con la termocupla se producen dos uniones de referencia: entre el cable de cobre con el alambre de metal A y entre el cable de cobre y el alambre de metal B. Si ambas uniones están a la misma temperatura, se considera que no hay error adicional debido a esta conexión.

El cable de extensión es particular para cada tipo de termocupla, tiene polaridad y código de colores, dependiendo de la norma nacional de cada país donde fue fabricada. Por ejemplo, en Estados Unidos el cable rojo siempre es negativo, mientras en el resto del mundo el cable de color rojo es positivo.

Tabla 4-7. Resumen termocuplas

Código ANSI	Terminal +	Terminal -	Rango de temperatura	Salida mV
J	Hierro	Constatan	0 a 750°C	0 a 42.283
K	Níquel - Cromo	Níquel - Aluminio	-200 a 1250°C	-5.973 a 50.633
V*	Cobre	Cobre - Níquel	0 a 80 °C	
T	Cobre	Cobre - Níquel	-200 a 350°C	-5.602 a 17.816
E	Níquel - Cromo	Cobre - Níquel	-200 a 900°C	-8.824 a 68.783
N*	Níquel - Cromo - Si	Níquel - Si - Manganeso	-270 a 1300°C	-4.345 a 47.502
R	Platino 13%- Rodio	Platino	0 a 1450°C	0 a 16.741
S	Platino 10%- Rodio	Platino	0 a 1450°C	0 a 14.973
U*	Cobre	Cobre - Níquel	0 a 50°C	
B	Platino 30%- Rodio	Platino 6% - Rodio	0 a 1700°C	0 a 12.426
G*	Tungsteno	Tungsteno - Rodio 26%	0 a 2320°C	0 a 38.564
C*	Tungsteno - Rodio 5%	Tungsteno - Rodio 26%	0 a 2320°C	0 a 37.066
D*	Tungsteno - Rodio 3%	Tungsteno - Rodio 26%	0 a 2320°C	0 a 39.506

4.9.2. Características de los termopares

4.9.2.1. Termocupla tipo J

El hierro es el elemento positivo. Es un metal barato que raramente se

procesa en forma pura. Es una termocupla muy usada, porque tiene un alto coeficiente Seebeck y bajo precio. Nunca debe usarse con temperaturas mayores a 760°C para evitar la transformación magnética que puede causar descalibración cuando retorna a bajas temperaturas. Se usa en atmósferas secas o reductoras, pero se destruye en atmósferas oxidantes. Se suelda con llama neutra aportando constatan.

4.9.2.2. Termocupla tipo K

Su uso está limitado a atmósferas oxidantes. Es la más popular debido a su amplio rango de medición de temperatura. Se suelda con llama neutra y poco oxidante aportando níquel.

4.9.2.3. Termocupla tipo T

Se usa en bajas temperaturas y aplicaciones criogénicas. Es la única termocupla que presenta errores en la región bajo 0°C.

4.9.2.4. Termocupla tipo E

No tiene especificados los errores bajo 0°C. Es ideal para medición de bajas temperaturas, por su alto coeficiente Seebeck (58 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$). Posee baja conductividad térmica y resistencia a la corrosión. Su coeficiente Seebeck es el más alto, por lo cual pueden ser usadas para detectar pequeños cambios de temperatura.

4.9.2.5. Termocuplas tipo R, S

Las termocuplas basadas en platino son las más estables. Por esta razón es usada para calibración de temperaturas entre el punto de antimonio (630.74°C) y el punto de la plata (1064.43°C). Se deben proteger contra choques mecánicos, vibraciones y contra la acción de los gases. Se suelda con soplete de oxi-hidrógeno o arco eléctrico de corriente continua y electrodo de carbono.

4.9.2.6. Termocupla tipo B

Presenta curva de doble valor y un bajo efecto Seebeck a bajas temperaturas, por lo tanto no se usa por debajo de 50°C. No se debe insertar en tubos metálicos. Se usa en altas temperaturas, especialmente en industrias de vidrio.

4.9.3. Coeficientes Seebeck

Tabla 4-8. Coeficientes Seebeck

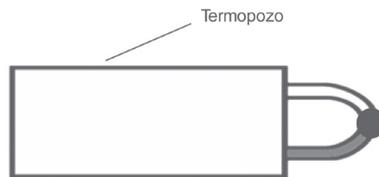
Tipo termocupla	Coeficiente Seebeck	$\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$
E	62	6.2
J	51	5.1
K	40	4.0
R	7	0.7
S	7	0.7
T	40	4.0

4.9.4. Tipos de termopozos

4.9.4.1. Junta expuesta

El aislamiento es sellado para la penetración de líquidos y gases. Este tipo de junta provee respuesta rápida, pero expone los cables del termopar a daño mecánico o corrosión.

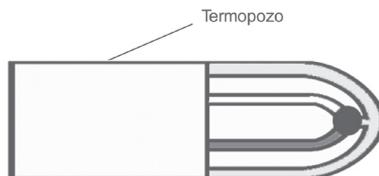
Figura 4-20. Termopozo con unión expuesta



4.9.4.2. Unión aterrizada

El termopozo y los conductores están totalmente en contacto, en una unión integral. Recomendado en líquidos y gases a altas presiones. El cable es protegido de la corrosión. En la unión aterrizada, el tiempo de respuesta es semejante al de la junta expuesta.

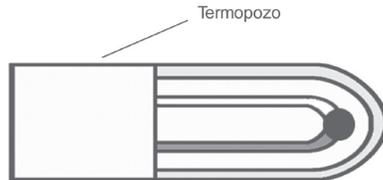
Figura 4-21. Termopozo con unión aterrizada



4.9.4.3. Unión no aterrizada

La unión de la termocupla es totalmente aislada del termopozo. Es excelente en aplicaciones donde la pérdida de fuerza electromotriz puede afectar la lectura. En la unión no aterrizada el tiempo de respuesta es mucho mayor que la unión aterrizada.

Figura 4-22. Termopozo con unión no aterrizada



Resumen termocuplas

Ventajas
Principio de medición simple
Robustas
Menor costo que los termómetros de resistencia
Gran variedad
Amplios rangos de temperatura
Desventajas
Salida no lineal
Pequeños cambios de voltaje en la salida
Requiere referencia de la temperatura ambiente
Menos estables que los termómetros de resistencia

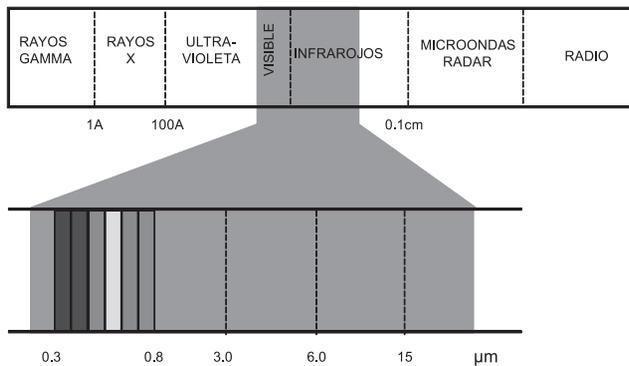
4.10. TERMÓMETROS DE RADIACIÓN

La medición de temperatura con termómetros de radiación se basa en el principio que todos los cuerpos que tengan una temperatura por encima del cero absoluto ($^{\circ}\text{K}$), irradian energía.

El calor en dicho cuerpo produce vibración molecular, debido al movimiento de los electrones, los cuales generan acoplamiento magnético para producir la emisión. La energía radiante por el cuerpo caliente es emitida en forma de ondas electromagnéticas (fotones) que viajan a la velocidad de la luz.

Los termómetros de radiación miden la energía radiada por un objeto en el rango de la porción visible de la luz (0.35 a 0.75 μm) y parte en la porción infrarroja (0.75 a 20 μm) del espectro electromagnético.

Figura 4-23. Espectro electromagnético



En la porción visible del espectro, la energía radiante aparece como colores.

Un termómetro de radiación en términos sencillos, está conformado por un sistema óptico y un detector. El sistema óptico enfoca la energía emitida por el objeto hacia el detector, el cual es sensible a la radiación. La salida del detector es proporcional a la cantidad de energía radiada por el objeto medido (menos la cantidad absorbida por el sistema óptico) y la respuesta del detector, a la longitud de onda de la radiación específica.

La salida del sensor es amplificada y dependiendo de la aplicación puede servir para indicación local o puede ser acondicionada, para enviar de forma remota a otro equipo.

to tiene una reflectividad de 1 (emisividad = 0), mientras un cuerpo negro perfecto tiene una emisividad de 1 (reflectividad = 0).

Los objetos no metálicos tienen una baja reflectividad y normalmente su emisividad es mayor de 0.9. Por el contrario los metales que tienen superficies brillantes, pueden tener alta reflectividad y una baja emisividad.

Los valores de emisividad de la mayoría de los materiales son conocidos y publicados usualmente en los manuales de operación de los equipos.

La relación entre intensidad radiante y la longitud de onda para un cuerpo negro a diferentes temperaturas, es mostrada en la figura 4-26. La intensidad total radiante, está dada como el área bajo la curva. En la figura 4-26 se muestran dos efectos importantes:

1. La intensidad de energía radiante incrementa cuando la temperatura incrementa.
2. El valor máximo de radiación se desplaza hacia longitudes de onda menores cuando la temperatura incrementa. En la porción visible de luz del espectro electromagnético, este efecto puede ser visto como un cambio de color en los metales calientes. El cambio de rojo a amarillo y luego de amarillo a blanco, se produce con el incremento de la temperatura.

La relación entre intensidad de radiación, longitud de onda y temperatura para un cuerpo negro, se expresa mediante la ley de radiación de Planck:

$$Q_{\lambda} = C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda t}} - 1 \right)^{-1}$$

Donde:

Q_{λ} : Intensidad de radiación emitida por un cuerpo negro.
a una temperatura t y longitud de onda λ .

λ : Longitud de onda (cm).

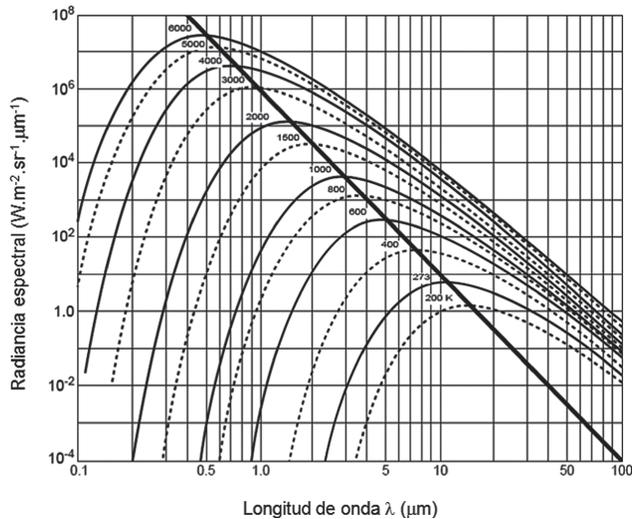
t : Temperatura (K).

C_1 : Constante $3.74 \times 10^{12} \text{ Wcm}^2$.

C_2 : Constante 1.44 cmK.

Ecuación 4-6. Ley de radiación de Planck.

Figura 4-26. Características de radiación de un cuerpo negro en relación con su temperatura



Otras fórmulas usadas por los pirómetros de radiación, se derivan de la ley de radiación de Planck. Por ejemplo, a una temperatura determinada la intensidad de radiación total de un cuerpo negro está dada por el área bajo la curva. La ley de Stefan-Boltzmann provee la siguiente fórmula para calcular la radiación total de un cuerpo negro a una temperatura determinada.

$$W = \sigma T^4$$

Donde:

W : Radiación total por unidad de área.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann = W/cm^2K .

T : Temperatura (K).

Ecuación 4-7. Ley de Stefan-Boltzmann.

Los termómetros de radiación pueden medir la radiación emitida por un objeto a distancia. No es necesario el contacto directo entre el instrumento y el objeto, como sucede con los otros métodos de medición de temperatura. Los termómetros de radiación son especialmente usados para medir temperaturas de objetos en movimiento, superficies de difícil acceso o aquellos objetos que no pueden ser tocados.

Resumen pirómetros de radiación

Ventajas

No hay contacto físico

Rango amplio

Respuesta rápida

Medición en altas temperaturas

Desventajas

Escala no lineal

Puede afectarse la medición por las características del medio

Costo elevado

4.11. RESUMEN MEDIDORES DE TEMPERATURA

	Rango (°C)	Precisión	Respuesta	Costo
Termómetros mecánicos				
Termómetro de vidrio	-200 a 600 °C	0.01 a 2%	Moderada	Medio
Bimetálico	-130 a 450 °C	0.5 a 1% S.S.†	Moderada	Bajo
Bulbo - capilar	-240 a 540 °C	0.5 a 2% S.S.†	Buena	Medio
Termómetros eléctricos				
Termocuplas	-200 a 1700 °C	0.5 a 0.75 %	Rápida	Medio
RTDs	-200 a 650 °C	0.12 a 0.5% ¹	Buena	Alto
Termistores	-100 a 500 °C	0.5%	Rápida	Bajo
Estado sólido (IC)	-55 a 150 °C	0.8 %	Lenta	Bajo
Pirómetros de radiación	600 a 3500 °C	0.5 a 4% F.S.	Rápida	Muy alto

¹ La precisión de una PT-100 clase B es de 0.12% con temperaturas cercanas a °C y de 0.5 % con temperaturas cercanas al valor máximo (650°C)

4.12. TABLAS DE TERMOCUPLAS Y PT 100



Voltaje termoelectrónico en milivoltios (mV)

°C	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	°C
-200	-8.095	-8.076	-8.057	-8.037	-8.017	-7.996	-7.976	-7.955	-7.934	-7.912	-7.890	-200
-190	-7.890	-7.868	-7.846	-7.824	-7.801	-7.778	-7.755	-7.731	-7.707	-7.683	-7.659	-190
-180	-7.659	-7.634	-7.610	-7.585	-7.559	-7.534	-7.508	-7.482	-7.456	-7.429	-7.403	-180
-170	-7.403	-7.376	-7.348	-7.321	-7.293	-7.265	-7.237	-7.209	-7.181	-7.152	-7.123	-170
-160	-7.123	-7.094	-7.064	-7.035	-7.005	-6.975	-6.944	-6.914	-6.883	-6.853	-6.821	-160
-150	-6.821	-6.790	-6.759	-6.727	-6.695	-6.663	-6.631	-6.598	-6.566	-6.533	-6.500	-150
-140	-6.500	-6.467	-6.433	-6.400	-6.366	-6.332	-6.298	-6.263	-6.229	-6.194	-6.159	-140
-130	-6.159	-6.124	-6.089	-6.054	-6.018	-5.982	-5.946	-5.910	-5.874	-5.838	-5.801	-130
-120	-5.801	-5.764	-5.727	-5.690	-5.653	-5.616	-5.578	-5.541	-5.503	-5.465	-5.426	-120
-110	-5.426	-5.388	-5.350	-5.311	-5.272	-5.233	-5.194	-5.155	-5.116	-5.076	-5.037	-110
-100	-5.037	-4.997	-4.957	-4.917	-4.877	-4.836	-4.796	-4.755	-4.714	-4.674	-4.633	-100
-90	-4.633	-4.591	-4.550	-4.509	-4.467	-4.425	-4.384	-4.342	-4.300	-4.257	-4.215	-90
-80	-4.215	-4.173	-4.130	-4.088	-4.045	-4.002	-3.959	-3.916	-3.872	-3.829	-3.786	-80
-70	-3.786	-3.742	-3.698	-3.654	-3.610	-3.566	-3.522	-3.478	-3.434	-3.389	-3.344	-70
-60	-3.344	-3.300	-3.255	-3.210	-3.165	-3.120	-3.075	-3.029	-2.984	-2.938	-2.893	-60
-50	-2.893	-2.847	-2.801	-2.755	-2.709	-2.663	-2.617	-2.571	-2.524	-2.478	-2.431	-50
-40	-2.431	-2.385	-2.338	-2.291	-2.244	-2.197	-2.150	-2.103	-2.055	-2.008	-1.961	-40
-30	-1.961	-1.913	-1.865	-1.818	-1.770	-1.722	-1.674	-1.626	-1.578	-1.530	-1.482	-30
-20	-1.482	-1.433	-1.385	-1.336	-1.288	-1.239	-1.190	-1.142	-1.093	-1.044	-0.995	-20
-10	-0.995	-0.946	-0.896	-0.847	-0.798	-0.749	-0.699	-0.650	-0.600	-0.550	-0.501	-10
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
0	0.000	0.050	0.101	0.151	0.202	0.253	0.303	0.354	0.405	0.456	0.507	0
10	0.507	0.558	0.609	0.660	0.711	0.762	0.814	0.865	0.916	0.968	1.019	10
20	1.019	1.071	1.122	1.174	1.226	1.277	1.329	1.381	1.433	1.485	1.537	20
30	1.537	1.589	1.641	1.693	1.745	1.797	1.849	1.902	1.954	2.006	2.059	30
40	2.059	2.111	2.164	2.216	2.269	2.322	2.374	2.427	2.480	2.532	2.585	40
50	2.585	2.638	2.691	2.744	2.797	2.850	2.903	2.956	3.009	3.062	3.116	50
60	3.116	3.169	3.222	3.275	3.329	3.382	3.436	3.489	3.543	3.596	3.650	60
70	3.650	3.703	3.757	3.810	3.864	3.918	3.971	4.025	4.079	4.133	4.187	70
80	4.187	4.240	4.294	4.348	4.402	4.456	4.510	4.564	4.618	4.672	4.726	80
90	4.726	4.781	4.835	4.889	4.943	4.997	5.052	5.106	5.160	5.215	5.269	90
100	5.269	5.323	5.378	5.432	5.487	5.541	5.595	5.650	5.705	5.759	5.814	100
110	5.814	5.868	5.923	5.977	6.032	6.087	6.141	6.196	6.251	6.306	6.360	110
120	6.360	6.415	6.470	6.525	6.579	6.634	6.689	6.744	6.799	6.854	6.909	120
130	6.909	6.964	7.019	7.074	7.129	7.184	7.239	7.294	7.349	7.404	7.459	130
140	7.459	7.514	7.569	7.624	7.679	7.734	7.789	7.844	7.900	7.955	8.010	140
150	8.010	8.065	8.120	8.175	8.231	8.286	8.341	8.396	8.452	8.507	8.562	150
160	8.562	8.618	8.673	8.728	8.783	8.839	8.894	8.949	9.005	9.060	9.115	160
170	9.115	9.171	9.226	9.282	9.337	9.392	9.448	9.503	9.559	9.614	9.669	170
180	9.669	9.725	9.780	9.836	9.891	9.947	10.002	10.057	10.113	10.168	10.224	180
190	10.224	10.279	10.335	10.390	10.446	10.501	10.557	10.612	10.668	10.723	10.779	190



TERMOCUPLA

TIPO

J

Voltaje termoeléctrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
210	11.334	11.389	11.445	11.501	11.556	11.612	11.667	11.723	11.778	11.834	11.889	210
220	11.889	11.945	12.000	12.056	12.111	12.167	12.222	12.278	12.334	12.389	12.445	220
230	12.445	12.500	12.556	12.611	12.667	12.722	12.778	12.833	12.889	12.944	13.000	230
240	13.000	13.056	13.111	13.167	13.222	13.278	13.333	13.389	13.444	13.500	13.555	240
250	13.555	13.611	13.666	13.722	13.777	13.833	13.888	13.944	13.999	14.055	14.110	250
260	14.110	14.166	14.221	14.277	14.332	14.388	14.443	14.499	14.554	14.609	14.665	260
270	14.665	14.720	14.776	14.831	14.887	14.942	14.998	15.053	15.109	15.164	15.219	270
280	15.219	15.275	15.330	15.386	15.441	15.496	15.552	15.607	15.663	15.718	15.773	280
290	15.773	15.829	15.884	15.940	15.995	16.050	16.106	16.161	16.216	16.272	16.327	290
300	16.327	16.383	16.438	16.493	16.549	16.604	16.659	16.715	16.770	16.825	16.881	300
310	16.881	16.936	16.991	17.046	17.102	17.157	17.212	17.268	17.323	17.378	17.434	310
320	17.434	17.489	17.544	17.599	17.655	17.710	17.765	17.820	17.876	17.931	17.986	320
330	17.986	18.041	18.097	18.152	18.207	18.262	18.318	18.373	18.428	18.483	18.538	330
340	18.538	18.594	18.649	18.704	18.759	18.814	18.870	18.925	18.980	19.035	19.090	340
350	19.090	19.146	19.201	19.256	19.311	19.366	19.422	19.477	19.532	19.587	19.642	350
360	19.642	19.697	19.753	19.808	19.863	19.918	19.973	20.028	20.083	20.138	20.194	360
370	20.194	20.249	20.304	20.359	20.414	20.469	20.525	20.580	20.635	20.690	20.745	370
380	20.745	20.800	20.855	20.911	20.966	21.021	21.076	21.131	21.186	21.241	21.297	380
390	21.297	21.352	21.407	21.462	21.517	21.572	21.627	21.683	21.738	21.793	21.848	390
400	21.848	21.903	21.958	22.014	22.069	22.124	22.179	22.234	22.289	22.345	22.400	400

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
410	22.400	22.455	22.510	22.565	22.620	22.676	22.731	22.786	22.841	22.896	22.952	410
420	22.952	23.007	23.062	23.117	23.172	23.228	23.283	23.338	23.393	23.449	23.504	420
430	23.504	23.559	23.614	23.670	23.725	23.780	23.835	23.891	23.946	24.001	24.057	430
440	24.057	24.112	24.167	24.223	24.278	24.333	24.389	24.444	24.499	24.555	24.610	440
450	24.610	24.665	24.721	24.776	24.832	24.887	24.943	24.998	25.053	25.109	25.164	450
460	25.164	25.220	25.275	25.331	25.386	25.442	25.497	25.553	25.608	25.664	25.720	460
470	25.720	25.775	25.831	25.886	25.942	25.998	26.053	26.109	26.165	26.220	26.276	470
480	26.276	26.332	26.387	26.443	26.499	26.555	26.610	26.666	26.722	26.778	26.834	480
490	26.834	26.889	26.945	27.001	27.057	27.113	27.169	27.225	27.281	27.337	27.393	490
500	27.393	27.449	27.505	27.561	27.617	27.673	27.729	27.785	27.841	27.897	27.953	500
510	27.953	28.010	28.066	28.122	28.178	28.234	28.291	28.347	28.403	28.460	28.516	510
520	28.516	28.572	28.629	28.685	28.741	28.798	28.854	28.911	28.967	29.024	29.080	520
530	29.080	29.137	29.194	29.250	29.307	29.363	29.420	29.477	29.534	29.590	29.647	530
540	29.647	29.704	29.761	29.818	29.874	29.931	29.988	30.045	30.102	30.159	30.216	540
550	30.216	30.273	30.330	30.387	30.444	30.502	30.559	30.616	30.673	30.730	30.788	550
560	30.788	30.845	30.902	30.960	31.017	31.074	31.132	31.189	31.247	31.304	31.362	560
570	31.362	31.419	31.477	31.535	31.592	31.650	31.708	31.766	31.823	31.881	31.939	570
580	31.939	31.997	32.055	32.113	32.171	32.229	32.287	32.345	32.403	32.461	32.519	580
590	32.519	32.577	32.636	32.694	32.752	32.810	32.869	32.927	32.985	33.044	33.102	590
600	33.102	33.161	33.219	33.278	33.337	33.395	33.454	33.513	33.571	33.630	33.689	600



TERMOCUPLA

TIPO J

Voltaje termoelectrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
610	33.689	33.748	33.807	33.866	33.925	33.984	34.043	34.102	34.161	34.220	34.279	610
620	34.279	34.338	34.397	34.457	34.516	34.575	34.635	34.694	34.754	34.813	34.873	620
630	34.873	34.932	34.992	35.051	35.111	35.171	35.230	35.290	35.350	35.410	35.470	630
640	35.470	35.530	35.590	35.650	35.710	35.770	35.830	35.890	35.950	36.010	36.071	640
650	36.071	36.131	36.191	36.252	36.312	36.373	36.433	36.494	36.554	36.615	36.675	650
660	36.675	36.736	36.797	36.858	36.918	36.979	37.040	37.101	37.162	37.223	37.284	660
670	37.284	37.345	37.406	37.467	37.528	37.590	37.651	37.712	37.773	37.835	37.896	670
680	37.896	37.958	38.019	38.081	38.142	38.204	38.265	38.327	38.389	38.450	38.512	680
690	38.512	38.574	38.636	38.698	38.760	38.822	38.884	38.946	39.008	39.070	39.132	690
700	39.132	39.194	39.256	39.318	39.381	39.443	39.505	39.568	39.630	39.693	39.755	700
710	39.755	39.818	39.880	39.943	40.005	40.068	40.131	40.193	40.256	40.319	40.382	710
720	40.382	40.445	40.508	40.570	40.633	40.696	40.759	40.822	40.886	40.949	41.012	720
730	41.012	41.075	41.138	41.201	41.265	41.328	41.391	41.455	41.518	41.581	41.645	730
740	41.645	41.708	41.772	41.835	41.899	41.962	42.026	42.090	42.153	42.217	42.281	740
750	42.281	42.344	42.408	42.472	42.536	42.599	42.663	42.727	42.791	42.855	42.919	750

TERMOCUPLA

TIPO

K

Voltaje termoelectrico en milivoltios (mV)

°C	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	°C
-260	-6.458	-6.457	-6.456	-6.455	-6.453	-6.452	-6.450	-6.448	-6.446	-6.444	-6.441	-260
-250	-6.441	-6.438	-6.435	-6.432	-6.429	-6.425	-6.421	-6.417	-6.413	-6.408	-6.404	-250
-240	-6.404	-6.399	-6.393	-6.388	-6.382	-6.377	-6.370	-6.364	-6.358	-6.351	-6.344	-240
-230	-6.344	-6.337	-6.329	-6.322	-6.314	-6.306	-6.297	-6.289	-6.280	-6.271	-6.262	-230
-220	-6.262	-6.252	-6.243	-6.233	-6.223	-6.213	-6.202	-6.192	-6.181	-6.170	-6.158	-220
-210	-6.158	-6.147	-6.135	-6.123	-6.111	-6.099	-6.087	-6.074	-6.061	-6.048	-6.035	-210
-200	-6.035	-6.021	-6.007	-5.994	-5.980	-5.965	-5.951	-5.936	-5.922	-5.907	-5.891	-200
-190	-5.891	-5.876	-5.861	-5.845	-5.829	-5.813	-5.797	-5.780	-5.763	-5.747	-5.730	-190
-180	-5.730	-5.713	-5.695	-5.678	-5.660	-5.642	-5.624	-5.606	-5.588	-5.569	-5.550	-180
-170	-5.550	-5.531	-5.512	-5.493	-5.474	-5.454	-5.435	-5.415	-5.395	-5.374	-5.354	-170
-160	-5.354	-5.333	-5.313	-5.292	-5.271	-5.250	-5.228	-5.207	-5.185	-5.163	-5.141	-160
-150	-5.141	-5.119	-5.097	-5.074	-5.052	-5.029	-5.006	-4.983	-4.960	-4.936	-4.913	-150
-140	-4.913	-4.889	-4.865	-4.841	-4.817	-4.793	-4.768	-4.744	-4.719	-4.694	-4.669	-140
-130	-4.669	-4.644	-4.618	-4.593	-4.567	-4.542	-4.516	-4.490	-4.463	-4.437	-4.411	-130
-120	-4.411	-4.384	-4.357	-4.330	-4.303	-4.276	-4.249	-4.221	-4.194	-4.166	-4.138	-120
-110	-4.138	-4.110	-4.082	-4.054	-4.025	-3.997	-3.968	-3.939	-3.911	-3.882	-3.852	-110
-100	-3.852	-3.823	-3.794	-3.764	-3.734	-3.705	-3.675	-3.645	-3.614	-3.584	-3.554	-100
-90	-3.554	-3.523	-3.492	-3.462	-3.431	-3.400	-3.368	-3.337	-3.306	-3.274	-3.243	-90
-80	-3.243	-3.211	-3.179	-3.147	-3.115	-3.083	-3.050	-3.018	-2.986	-2.953	-2.920	-80
-70	-2.920	-2.887	-2.854	-2.821	-2.788	-2.755	-2.721	-2.688	-2.654	-2.620	-2.587	-70
-60	-2.587	-2.553	-2.519	-2.485	-2.450	-2.416	-2.382	-2.347	-2.312	-2.278	-2.243	-60
-50	-2.243	-2.208	-2.173	-2.138	-2.103	-2.067	-2.032	-1.996	-1.961	-1.925	-1.889	-50
-40	-1.889	-1.854	-1.818	-1.782	-1.745	-1.709	-1.673	-1.637	-1.600	-1.564	-1.527	-40
-30	-1.527	-1.490	-1.453	-1.417	-1.380	-1.343	-1.305	-1.268	-1.231	-1.194	-1.156	-30
-20	-1.156	-1.119	-1.081	-1.043	-1.006	-0.968	-0.930	-0.892	-0.854	-0.816	-0.778	-20
-10	-0.778	-0.739	-0.701	-0.663	-0.624	-0.586	-0.547	-0.508	-0.470	-0.431	-0.392	-10
0	-0.392	-0.353	-0.314	-0.275	-0.236	-0.197	-0.157	-0.118	-0.079	-0.039	0.000	0

TERMOCUPLA

TIPO

K

Voltaje termoeléctrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397	0
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798	10
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203	20
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612	30
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023	40
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436	50
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851	60
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267	70
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682	80
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096	90
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509	100
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	4.920	110
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	5.328	120
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	5.735	130
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	6.138	140
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	6.540	150
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	6.941	160
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	7.340	170
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	7.739	180
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138	190
200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.499	8.539	200

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.860	8.900	8.940	210
220	8.940	8.980	9.020	9.061	9.101	9.141	9.181	9.222	9.262	9.302	9.343	220
230	9.343	9.383	9.423	9.464	9.504	9.545	9.585	9.626	9.666	9.707	9.747	230
240	9.747	9.788	9.828	9.869	9.909	9.950	9.991	10.031	10.072	10.113	10.153	240
250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561	250
260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971	260
270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382	270
280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795	280
290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209	290
300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624	300
310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040	310
320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457	320
330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874	330
340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293	340
350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.713	350
360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.133	360
370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.554	370
380	15.554	15.596	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.849	15.891	15.933	15.975	380
390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.397	390

TERMOCUPLA

TIPO

K

Voltaje termoelectrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.243	410
420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.667	420
430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091	430
440	18.091	18.134	18.176	18.218	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.516	440
450	18.516	18.558	18.601	18.643	18.686	18.728	18.771	18.813	18.856	18.898	18.941	450
460	18.941	18.983	19.026	19.068	19.111	19.154	19.196	19.239	19.281	19.324	19.366	460
470	19.366	19.409	19.451	19.494	19.537	19.579	19.622	19.664	19.707	19.750	19.792	470
480	19.792	19.835	19.877	19.920	19.962	20.005	20.048	20.090	20.133	20.175	20.218	480
490	20.218	20.261	20.303	20.346	20.389	20.431	20.474	20.516	20.559	20.602	20.644	490
500	20.644	20.687	20.730	20.772	20.815	20.857	20.900	20.943	20.985	21.028	21.071	500
510	21.071	21.113	21.156	21.199	21.241	21.284	21.326	21.369	21.412	21.454	21.497	510
520	21.497	21.540	21.582	21.625	21.668	21.710	21.753	21.796	21.838	21.881	21.924	520
530	21.924	21.966	22.009	22.052	22.094	22.137	22.179	22.222	22.265	22.307	22.350	530
540	22.350	22.393	22.435	22.478	22.521	22.563	22.606	22.649	22.691	22.734	22.776	540
550	22.776	22.819	22.862	22.904	22.947	22.990	23.032	23.075	23.117	23.160	23.203	550
560	23.203	23.245	23.288	23.331	23.373	23.416	23.458	23.501	23.544	23.586	23.629	560
570	23.629	23.671	23.714	23.757	23.799	23.842	23.884	23.927	23.970	24.012	24.055	570
580	24.055	24.097	24.140	24.182	24.225	24.267	24.310	24.353	24.395	24.438	24.480	580
590	24.480	24.523	24.565	24.608	24.650	24.693	24.735	24.778	24.820	24.863	24.905	590
600	24.905	24.948	24.990	25.033	25.075	25.118	25.160	25.203	25.245	25.288	25.330	600

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
610	25.330	25.373	25.415	25.458	25.500	25.543	25.585	25.627	25.670	25.712	25.755	610
620	25.755	25.797	25.840	25.882	25.924	25.967	26.009	26.052	26.094	26.136	26.179	620
630	26.179	26.221	26.263	26.306	26.348	26.390	26.433	26.475	26.517	26.560	26.602	630
640	26.602	26.644	26.687	26.729	26.771	26.814	26.856	26.898	26.940	26.983	27.025	640
650	27.025	27.067	27.109	27.152	27.194	27.236	27.278	27.320	27.363	27.405	27.447	650
660	27.447	27.489	27.531	27.574	27.616	27.658	27.700	27.742	27.784	27.826	27.869	660
670	27.869	27.911	27.953	27.995	28.037	28.079	28.121	28.163	28.205	28.247	28.289	670
680	28.289	28.332	28.374	28.416	28.458	28.500	28.542	28.584	28.626	28.668	28.710	680
690	28.710	28.752	28.794	28.835	28.877	28.919	28.961	29.003	29.045	29.087	29.129	690
700	29.129	29.171	29.213	29.255	29.297	29.338	29.380	29.422	29.464	29.506	29.548	700
710	29.548	29.589	29.631	29.673	29.715	29.757	29.798	29.840	29.882	29.924	29.965	710
720	29.965	30.007	30.049	30.090	30.132	30.174	30.216	30.257	30.299	30.341	30.382	720
730	30.382	30.424	30.466	30.507	30.549	30.590	30.632	30.674	30.715	30.757	30.798	730
740	30.798	30.840	30.881	30.923	30.964	31.006	31.047	31.089	31.130	31.172	31.213	740
750	31.213	31.255	31.296	31.338	31.379	31.421	31.462	31.504	31.545	31.586	31.628	750
760	31.628	31.669	31.710	31.752	31.793	31.834	31.876	31.917	31.958	32.000	32.041	760
770	32.041	32.082	32.124	32.165	32.206	32.247	32.289	32.330	32.371	32.412	32.453	770
780	32.453	32.495	32.536	32.577	32.618	32.659	32.700	32.742	32.783	32.824	32.865	780
790	32.865	32.906	32.947	32.988	33.029	33.070	33.111	33.152	33.193	33.234	33.275	790
800	33.275	33.316	33.357	33.398	33.439	33.480	33.521	33.562	33.603	33.644	33.685	800

TERMOCUPLA

TIPO

K

Voltaje termoeléctrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
810	33.685	33.726	33.767	33.808	33.848	33.889	33.930	33.971	34.012	34.053	34.093	810
820	34.093	34.134	34.175	34.216	34.257	34.297	34.338	34.379	34.420	34.460	34.501	820
830	34.501	34.542	34.582	34.623	34.664	34.704	34.745	34.786	34.826	34.867	34.908	830
840	34.908	34.948	34.989	35.029	35.070	35.110	35.151	35.192	35.232	35.273	35.313	840
850	35.313	35.354	35.394	35.435	35.475	35.516	35.556	35.596	35.637	35.677	35.718	850
860	35.718	35.758	35.798	35.839	35.879	35.920	35.960	36.000	36.041	36.081	36.121	860
870	36.121	36.162	36.202	36.242	36.282	36.323	36.363	36.403	36.443	36.484	36.524	870
880	36.524	36.564	36.604	36.644	36.685	36.725	36.765	36.805	36.845	36.885	36.925	880
890	36.925	36.965	37.006	37.046	37.086	37.126	37.166	37.206	37.246	37.286	37.326	890
900	37.326	37.366	37.406	37.446	37.486	37.526	37.566	37.606	37.646	37.686	37.725	900
910	37.725	37.765	37.805	37.845	37.885	37.925	37.965	38.005	38.044	38.084	38.124	910
920	38.124	38.164	38.204	38.243	38.283	38.323	38.363	38.402	38.442	38.482	38.522	920
930	38.522	38.561	38.601	38.641	38.680	38.720	38.760	38.799	38.839	38.878	38.918	930
940	38.918	38.958	38.997	39.037	39.076	39.116	39.155	39.195	39.235	39.274	39.314	940
950	39.314	39.353	39.393	39.432	39.471	39.511	39.550	39.590	39.629	39.669	39.708	950
960	39.708	39.747	39.787	39.826	39.866	39.905	39.944	39.984	40.023	40.062	40.101	960
970	40.101	40.141	40.180	40.219	40.259	40.298	40.337	40.376	40.415	40.455	40.494	970
980	40.494	40.533	40.572	40.611	40.651	40.690	40.729	40.768	40.807	40.846	40.885	980
990	40.885	40.924	40.963	41.002	41.042	41.081	41.120	41.159	41.198	41.237	41.276	990
1000	41.276	41.315	41.354	41.393	41.431	41.470	41.509	41.548	41.587	41.626	41.665	1000

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
1010	41.665	41.704	41.743	41.781	41.820	41.859	41.898	41.937	41.976	42.014	42.053	1010
1020	42.053	42.092	42.131	42.169	42.208	42.247	42.286	42.324	42.363	42.402	42.440	1020
1030	42.440	42.479	42.518	42.556	42.595	42.633	42.672	42.711	42.749	42.788	42.826	1030
1040	42.826	42.865	42.903	42.942	42.980	43.019	43.057	43.096	43.134	43.173	43.211	1040
1050	43.211	43.250	43.288	43.327	43.365	43.403	43.442	43.480	43.518	43.557	43.595	1050
1060	43.595	43.633	43.672	43.710	43.748	43.787	43.825	43.863	43.901	43.940	43.978	1060
1070	43.978	44.016	44.054	44.092	44.130	44.169	44.207	44.245	44.283	44.321	44.359	1070
1080	44.359	44.397	44.435	44.473	44.512	44.550	44.588	44.626	44.664	44.702	44.740	1080
1090	44.740	44.778	44.816	44.853	44.891	44.929	44.967	45.005	45.043	45.081	45.119	1090
1100	45.119	45.157	45.194	45.232	45.270	45.308	45.346	45.383	45.421	45.459	45.497	1100
1110	45.497	45.534	45.572	45.610	45.647	45.685	45.723	45.760	45.798	45.836	45.873	1110
1120	45.873	45.911	45.948	45.986	46.024	46.061	46.099	46.136	46.174	46.211	46.249	1120
1130	46.249	46.286	46.324	46.361	46.398	46.436	46.473	46.511	46.548	46.585	46.623	1130
1140	46.623	46.660	46.697	46.735	46.772	46.809	46.847	46.884	46.921	46.958	46.995	1140
1150	46.995	47.033	47.070	47.107	47.144	47.181	47.218	47.256	47.293	47.330	47.367	1150
1160	47.367	47.404	47.441	47.478	47.515	47.552	47.589	47.626	47.663	47.700	47.737	1160
1170	47.737	47.774	47.811	47.848	47.884	47.921	47.958	47.995	48.032	48.069	48.105	1170

TERMOCUPLA

TIPO

K

Voltaje termoelectrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
1210	49.202	49.239	49.275	49.311	49.348	49.384	49.420	49.456	49.493	49.529	49.565	1210
1220	49.565	49.601	49.637	49.674	49.710	49.746	49.782	49.818	49.854	49.890	49.926	1220
1230	49.926	49.962	49.998	50.034	50.070	50.106	50.142	50.178	50.214	50.250	50.286	1230
1240	50.286	50.322	50.358	50.393	50.429	50.465	50.501	50.537	50.572	50.608	50.644	1240
1250	50.644	50.680	50.715	50.751	50.787	50.822	50.858	50.894	50.929	50.965	51.000	1250
1260	51.000	51.036	51.071	51.107	51.142	51.178	51.213	51.249	51.284	51.320	51.355	1260
1270	51.355	51.391	51.426	51.461	51.497	51.532	51.567	51.603	51.638	51.673	51.708	1270
1280	51.708	51.744	51.779	51.814	51.849	51.885	51.920	51.955	51.990	52.025	52.060	1280
1290	52.060	52.095	52.130	52.165	52.200	52.235	52.270	52.305	52.340	52.375	52.410	1290
1300	52.410	52.445	52.480	52.515	52.550	52.585	52.620	52.654	52.689	52.724	52.759	1300
1310	52.759	52.794	52.828	52.863	52.898	52.932	52.967	53.002	53.037	53.071	53.106	1310
1320	53.106	53.140	53.175	53.210	53.244	53.279	53.313	53.348	53.382	53.417	53.451	1320
1330	53.451	53.486	53.520	53.555	53.589	53.623	53.658	53.692	53.727	53.761	53.795	1330
1340	53.795	53.830	53.864	53.898	53.932	53.967	54.001	54.035	54.069	54.104	54.138	1340
1350	54.138	54.172	54.206	54.240	54.274	54.308	54.343	54.377	54.411	54.445	54.479	1350
1360	54.479	54.513	54.547	54.581	54.615	54.649	54.683	54.717	54.751	54.785	54.819	1360
1370	54.819	54.852	54.886									1370

TERMOCUPLA

TIPO

E

Voltaje termoeléctrico en milivoltios (mV)

°C	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	°C
-260	-9.835	-9.833	-9.831	-9.828	-9.825	-9.821	-9.817	-9.813	-9.808	-9.802	-9.797	-260
-250	-9.797	-9.790	-9.784	-9.777	-9.770	-9.762	-9.754	-9.746	-9.737	-9.728	-9.718	-250
-240	-9.718	-9.709	-9.698	-9.688	-9.677	-9.666	-9.654	-9.642	-9.630	-9.617	-9.604	-240
-230	-9.604	-9.591	-9.577	-9.563	-9.548	-9.534	-9.519	-9.503	-9.487	-9.471	-9.455	-230
-220	-9.455	-9.438	-9.421	-9.404	-9.386	-9.368	-9.350	-9.331	-9.313	-9.293	-9.274	-220
-210	-9.274	-9.254	-9.234	-9.214	-9.193	-9.172	-9.151	-9.129	-9.107	-9.085	-9.063	-210
-200	-9.063	-9.040	-9.017	-8.994	-8.971	-8.947	-8.923	-8.899	-8.874	-8.850	-8.825	-200
-190	-8.825	-8.799	-8.774	-8.748	-8.722	-8.696	-8.669	-8.643	-8.616	-8.588	-8.561	-190
-180	-8.561	-8.533	-8.505	-8.477	-8.449	-8.420	-8.391	-8.362	-8.333	-8.303	-8.273	-180
-170	-8.273	-8.243	-8.213	-8.183	-8.152	-8.121	-8.090	-8.059	-8.027	-7.995	-7.963	-170
-160	-7.963	-7.931	-7.899	-7.866	-7.833	-7.800	-7.767	-7.733	-7.700	-7.666	-7.632	-160
-150	-7.632	-7.597	-7.563	-7.528	-7.493	-7.458	-7.423	-7.387	-7.351	-7.315	-7.279	-150
-140	-7.279	-7.243	-7.206	-7.170	-7.133	-7.096	-7.058	-7.021	-6.983	-6.945	-6.907	-140
-130	-6.907	-6.869	-6.831	-6.792	-6.753	-6.714	-6.675	-6.636	-6.596	-6.556	-6.516	-130
-120	-6.516	-6.476	-6.436	-6.396	-6.355	-6.314	-6.273	-6.232	-6.191	-6.149	-6.107	-120
-110	-6.107	-6.065	-6.023	-5.981	-5.939	-5.896	-5.853	-5.810	-5.767	-5.724	-5.681	-110
-100	-5.681	-5.637	-5.593	-5.549	-5.505	-5.461	-5.417	-5.372	-5.327	-5.282	-5.237	-100
-90	-5.237	-5.192	-5.147	-5.101	-5.055	-5.009	-4.963	-4.917	-4.871	-4.824	-4.777	-90
-80	-4.777	-4.731	-4.684	-4.636	-4.589	-4.542	-4.494	-4.446	-4.398	-4.350	-4.302	-80
-70	-4.302	-4.254	-4.205	-4.156	-4.107	-4.058	-4.009	-3.960	-3.911	-3.861	-3.811	-70
-60	-3.811	-3.761	-3.711	-3.661	-3.611	-3.561	-3.510	-3.459	-3.408	-3.357	-3.306	-60
-50	-3.306	-3.255	-3.204	-3.152	-3.100	-3.048	-2.996	-2.944	-2.892	-2.840	-2.787	-50
-40	-2.787	-2.735	-2.682	-2.629	-2.576	-2.523	-2.469	-2.416	-2.362	-2.309	-2.255	-40
-30	-2.255	-2.201	-2.147	-2.093	-2.038	-1.984	-1.929	-1.874	-1.820	-1.765	-1.709	-30
-20	-1.709	-1.654	-1.599	-1.543	-1.488	-1.432	-1.376	-1.320	-1.264	-1.208	-1.152	-20
-10	-1.152	-1.095	-1.039	-0.982	-0.925	-0.868	-0.811	-0.754	-0.697	-0.639	-0.582	-10
0	-0.582	-0.524	-0.466	-0.408	-0.350	-0.292	-0.234	-0.176	-0.117	-0.059	0.000	0

TERMOCUPLA

TIPO

E

Voltaje termoelectrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
0	0.000	0.059	0.118	0.176	0.235	0.294	0.354	0.413	0.472	0.532	0.591	0
10	0.591	0.651	0.711	0.770	0.830	0.890	0.950	1.010	1.071	1.131	1.192	10
20	1.192	1.252	1.313	1.373	1.434	1.495	1.556	1.617	1.678	1.740	1.801	20
30	1.801	1.862	1.924	1.986	2.047	2.109	2.171	2.233	2.295	2.357	2.420	30
40	2.420	2.482	2.545	2.607	2.670	2.733	2.795	2.858	2.921	2.984	3.048	40
50	3.048	3.111	3.174	3.238	3.301	3.365	3.429	3.492	3.556	3.620	3.685	50
60	3.685	3.749	3.813	3.877	3.942	4.006	4.071	4.136	4.200	4.265	4.330	60
70	4.330	4.395	4.460	4.526	4.591	4.656	4.722	4.788	4.853	4.919	4.985	70
80	4.985	5.051	5.117	5.183	5.249	5.315	5.382	5.448	5.514	5.581	5.648	80
90	5.648	5.714	5.781	5.848	5.915	5.982	6.049	6.117	6.184	6.251	6.319	90
100	6.319	6.386	6.454	6.522	6.590	6.658	6.725	6.794	6.862	6.930	6.998	100
110	6.998	7.066	7.135	7.203	7.272	7.341	7.409	7.478	7.547	7.616	7.685	110
120	7.685	7.754	7.823	7.892	7.962	8.031	8.101	8.170	8.240	8.309	8.379	120
130	8.379	8.449	8.519	8.589	8.659	8.729	8.799	8.869	8.940	9.010	9.081	130
140	9.081	9.151	9.222	9.292	9.363	9.434	9.505	9.576	9.647	9.718	9.789	140
150	9.789	9.860	9.931	10.003	10.074	10.145	10.217	10.288	10.360	10.432	10.503	150
160	10.503	10.575	10.647	10.719	10.791	10.863	10.935	11.007	11.080	11.152	11.224	160
170	11.224	11.297	11.369	11.442	11.514	11.587	11.660	11.733	11.805	11.878	11.951	170
180	11.951	12.024	12.097	12.170	12.243	12.317	12.390	12.463	12.537	12.610	12.684	180
190	12.684	12.757	12.831	12.904	12.978	13.052	13.126	13.199	13.273	13.347	13.421	190
200	13.421	13.495	13.569	13.644	13.718	13.792	13.866	13.941	14.015	14.090	14.164	200

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
210	14.164	14.239	14.313	14.388	14.463	14.537	14.612	14.687	14.762	14.837	14.912	210
220	14.912	14.987	15.062	15.137	15.212	15.287	15.362	15.438	15.513	15.588	15.664	220
230	15.664	15.739	15.815	15.890	15.966	16.041	16.117	16.193	16.269	16.344	16.420	230
240	16.420	16.496	16.572	16.648	16.724	16.800	16.876	16.952	17.028	17.104	17.181	240
250	17.181	17.257	17.333	17.409	17.486	17.562	17.639	17.715	17.792	17.868	17.945	250
260	17.945	18.021	18.098	18.175	18.252	18.328	18.405	18.482	18.559	18.636	18.713	260
270	18.713	18.790	18.867	18.944	19.021	19.098	19.175	19.252	19.330	19.407	19.484	270
280	19.484	19.561	19.639	19.716	19.794	19.871	19.948	20.026	20.103	20.181	20.259	280
290	20.259	20.336	20.414	20.492	20.569	20.647	20.725	20.803	20.880	20.958	21.036	290
300	21.036	21.114	21.192	21.270	21.348	21.426	21.504	21.582	21.660	21.739	21.817	300
310	21.817	21.895	21.973	22.051	22.130	22.208	22.286	22.365	22.443	22.522	22.600	310
320	22.600	22.678	22.757	22.835	22.914	22.993	23.071	23.150	23.228	23.307	23.386	320
330	23.386	23.464	23.543	23.622	23.701	23.780	23.858	23.937	24.016	24.095	24.174	330
340	24.174	24.253	24.332	24.411	24.490	24.569	24.648	24.727	24.806	24.885	24.964	340
350	24.964	25.044	25.123	25.202	25.281	25.360	25.440	25.519	25.598	25.678	25.757	350
360	25.757	25.836	25.916	25.995	26.075	26.154	26.233	26.313	26.392	26.472	26.552	360
370	26.552	26.631	26.711	26.790	26.870	26.950	27.029	27.109	27.189	27.268	27.348	370
380	27.348	27.428	27.507	27.587	27.667	27.747	27.827	27.907	27.986	28.066	28.146	380
390	28.146	28.226	28.306	28.386	28.466	28.546	28.626	28.706	28.786	28.866	28.946	390
400	28.946	29.026	29.106	29.186	29.266	29.346	29.427	29.507	29.587	29.667	29.747	400

TERMOCUPLA

TIPO

E

Voltaje termoelectrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
410	29.747	29.827	29.908	29.988	30.068	30.148	30.229	30.309	30.389	30.470	30.550	410
420	30.550	30.630	30.711	30.791	30.871	30.952	31.032	31.112	31.193	31.273	31.354	420
430	31.354	31.434	31.515	31.595	31.676	31.756	31.837	31.917	31.998	32.078	32.159	430
440	32.159	32.239	32.320	32.400	32.481	32.562	32.642	32.723	32.803	32.884	32.965	440
450	32.965	33.045	33.126	33.207	33.287	33.368	33.449	33.529	33.610	33.691	33.772	450
460	33.772	33.852	33.933	34.014	34.095	34.175	34.256	34.337	34.418	34.498	34.579	460
470	34.579	34.660	34.741	34.822	34.902	34.983	35.064	35.145	35.226	35.307	35.387	470
480	35.387	35.468	35.549	35.630	35.711	35.792	35.873	35.954	36.034	36.115	36.196	480
490	36.196	36.277	36.358	36.439	36.520	36.601	36.682	36.763	36.843	36.924	37.005	490
500	37.005	37.086	37.167	37.248	37.329	37.410	37.491	37.572	37.653	37.734	37.815	500
510	37.815	37.896	37.977	38.058	38.139	38.220	38.300	38.381	38.462	38.543	38.624	510
520	38.624	38.705	38.786	38.867	38.948	39.029	39.110	39.191	39.272	39.353	39.434	520
530	39.434	39.515	39.596	39.677	39.758	39.839	39.920	40.001	40.082	40.163	40.243	530
540	40.243	40.324	40.405	40.486	40.567	40.648	40.729	40.810	40.891	40.972	41.053	540
550	41.053	41.134	41.215	41.296	41.377	41.457	41.538	41.619	41.700	41.781	41.862	550
560	41.862	41.943	42.024	42.105	42.185	42.266	42.347	42.428	42.509	42.590	42.671	560
570	42.671	42.751	42.832	42.913	42.994	43.075	43.156	43.236	43.317	43.398	43.479	570
580	43.479	43.560	43.640	43.721	43.802	43.883	43.963	44.044	44.125	44.206	44.286	580
590	44.286	44.367	44.448	44.529	44.609	44.690	44.771	44.851	44.932	45.013	45.093	590
600	45.093	45.174	45.255	45.335	45.416	45.497	45.577	45.658	45.738	45.819	45.900	600
410	29.747	29.827	29.908	29.988	30.068	30.148	30.229	30.309	30.389	30.470	30.550	410

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
610	45.900	45.980	46.061	46.141	46.222	46.302	46.383	46.463	46.544	46.624	46.705	610
620	46.705	46.785	46.866	46.946	47.027	47.107	47.188	47.268	47.349	47.429	47.509	620
630	47.509	47.590	47.670	47.751	47.831	47.911	47.992	48.072	48.152	48.233	48.313	630
640	48.313	48.393	48.474	48.554	48.634	48.715	48.795	48.875	48.955	49.035	49.116	640
650	49.116	49.196	49.276	49.356	49.436	49.517	49.597	49.677	49.757	49.837	49.917	650
660	49.917	49.997	50.077	50.157	50.238	50.318	50.398	50.478	50.558	50.638	50.718	660
670	50.718	50.798	50.878	50.958	51.038	51.118	51.197	51.277	51.357	51.437	51.517	670
680	51.517	51.597	51.677	51.757	51.837	51.916	51.996	52.076	52.156	52.236	52.315	680
690	52.315	52.395	52.475	52.555	52.634	52.714	52.794	52.873	52.953	53.033	53.112	690
700	53.112	53.192	53.272	53.351	53.431	53.510	53.590	53.670	53.749	53.829	53.908	700
710	53.908	53.988	54.067	54.147	54.226	54.306	54.385	54.465	54.544	54.624	54.703	710
720	54.703	54.782	54.862	54.941	55.021	55.100	55.179	55.259	55.338	55.417	55.497	720
730	55.497	55.576	55.655	55.734	55.814	55.893	55.972	56.051	56.131	56.210	56.289	730
740	56.289	56.368	56.447	56.526	56.606	56.685	56.764	56.843	56.922	57.001	57.080	740
750	57.080	57.159	57.238	57.317	57.396	57.475	57.554	57.633	57.712	57.791	57.870	750
760	57.870	57.949	58.028	58.107	58.186	58.265	58.343	58.422	58.501	58.580	58.659	760
770	58.659	58.738	58.816	58.895	58.974	59.053	59.131	59.210	59.289	59.367	59.446	770
780	59.446	59.525	59.604	59.682	59.761	59.839	59.918	59.997	60.075	60.154	60.232	780
790	60.232	60.311	60.390	60.468	60.547	60.625	60.704	60.782	60.860	60.939	61.017	790
800	61.017	61.096	61.174	61.253	61.331	61.409	61.488	61.566	61.644	61.723	61.801	800

TERMOCUPLA

TIPO

E

Voltaje termoeléctrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
810	61.801	61.879	61.958	62.036	62.114	62.192	62.271	62.349	62.427	62.505	62.583	810
820	62.583	62.662	62.740	62.818	62.896	62.974	63.052	63.130	63.208	63.286	63.364	820
830	63.364	63.442	63.520	63.598	63.676	63.754	63.832	63.910	63.988	64.066	64.144	830
840	64.144	64.222	64.300	64.377	64.455	64.533	64.611	64.689	64.766	64.844	64.922	840
850	64.922	65.000	65.077	65.155	65.233	65.310	65.388	65.465	65.543	65.621	65.698	850
860	65.698	65.776	65.853	65.931	66.008	66.086	66.163	66.241	66.318	66.396	66.473	860
870	66.473	66.550	66.628	66.705	66.782	66.860	66.937	67.014	67.092	67.169	67.246	870
880	67.246	67.323	67.400	67.478	67.555	67.632	67.709	67.786	67.863	67.940	68.017	880
890	68.017	68.094	68.171	68.248	68.325	68.402	68.479	68.556	68.633	68.710	68.787	890
900	68.787	68.863	68.940	69.017	69.094	69.171	69.247	69.324	69.401	69.477	69.554	900
910	69.554	69.631	69.707	69.784	69.860	69.937	70.013	70.090	70.166	70.243	70.319	910
920	70.319	70.396	70.472	70.548	70.625	70.701	70.777	70.854	70.930	71.006	71.082	920
930	71.082	71.159	71.235	71.311	71.387	71.463	71.539	71.615	71.692	71.768	71.844	930
940	71.844	71.920	71.996	72.072	72.147	72.223	72.299	72.375	72.451	72.527	72.603	940
950	72.603	72.678	72.754	72.830	72.906	72.981	73.057	73.133	73.208	73.284	73.360	950
960	73.360	73.435	73.511	73.586	73.662	73.738	73.813	73.889	73.964	74.040	74.115	960
970	74.115	74.190	74.266	74.341	74.417	74.492	74.567	74.643	74.718	74.793	74.869	970
980	74.869	74.944	75.019	75.095	75.170	75.245	75.320	75.395	75.471	75.546	75.621	980
990	75.621	75.696	75.771	75.847	75.922	75.997	76.072	76.147	76.223	76.298	76.373	990



TERMOCUPLA

TIPO T

Voltaje termoeléctrico en milivoltios (mV)

°C	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	°C
-260	-6.258	-6.256	-6.255	-6.253	-6.251	-6.248	-6.245	-6.242	-6.239	-6.236	-6.232	-260
-250	-6.232	-6.228	-6.223	-6.219	-6.214	-6.209	-6.204	-6.198	-6.193	-6.187	-6.180	-250
-240	-6.180	-6.174	-6.167	-6.160	-6.153	-6.146	-6.138	-6.130	-6.122	-6.114	-6.105	-240
-230	-6.105	-6.096	-6.087	-6.078	-6.068	-6.059	-6.049	-6.038	-6.028	-6.017	-6.007	-230
-220	-6.007	-5.996	-5.985	-5.973	-5.962	-5.950	-5.938	-5.926	-5.914	-5.901	-5.888	-220
-210	-5.888	-5.876	-5.863	-5.850	-5.836	-5.823	-5.809	-5.795	-5.782	-5.767	-5.753	-210
-200	-5.753	-5.739	-5.724	-5.710	-5.695	-5.680	-5.665	-5.650	-5.634	-5.619	-5.603	-200
-190	-5.603	-5.587	-5.571	-5.555	-5.539	-5.523	-5.506	-5.489	-5.473	-5.456	-5.439	-190
-180	-5.439	-5.421	-5.404	-5.387	-5.369	-5.351	-5.334	-5.316	-5.297	-5.279	-5.261	-180
-170	-5.261	-5.242	-5.224	-5.205	-5.186	-5.167	-5.148	-5.128	-5.109	-5.089	-5.070	-170
-160	-5.070	-5.050	-5.030	-5.010	-4.989	-4.969	-4.949	-4.928	-4.907	-4.886	-4.865	-160
-150	-4.865	-4.844	-4.823	-4.802	-4.780	-4.759	-4.737	-4.715	-4.693	-4.671	-4.648	-150
-140	-4.648	-4.626	-4.604	-4.581	-4.558	-4.535	-4.512	-4.489	-4.466	-4.443	-4.419	-140
-130	-4.419	-4.395	-4.372	-4.348	-4.324	-4.300	-4.275	-4.251	-4.226	-4.202	-4.177	-130
-120	-4.177	-4.152	-4.127	-4.102	-4.077	-4.052	-4.026	-4.000	-3.975	-3.949	-3.923	-120
-110	-3.923	-3.897	-3.871	-3.844	-3.818	-3.791	-3.765	-3.738	-3.711	-3.684	-3.657	-110
-100	-3.657	-3.629	-3.602	-3.574	-3.547	-3.519	-3.491	-3.463	-3.435	-3.407	-3.379	-100
-90	-3.379	-3.350	-3.322	-3.293	-3.264	-3.235	-3.206	-3.177	-3.148	-3.118	-3.089	-90
-80	-3.089	-3.059	-3.030	-3.000	-2.970	-2.940	-2.910	-2.879	-2.849	-2.818	-2.788	-80
-70	-2.788	-2.757	-2.726	-2.695	-2.664	-2.633	-2.602	-2.571	-2.539	-2.507	-2.476	-70
-60	-2.476	-2.444	-2.412	-2.380	-2.348	-2.316	-2.283	-2.251	-2.218	-2.186	-2.153	-60
-50	-2.153	-2.120	-2.087	-2.054	-2.021	-1.987	-1.954	-1.920	-1.887	-1.853	-1.819	-50
-40	-1.819	-1.785	-1.751	-1.717	-1.683	-1.648	-1.614	-1.579	-1.545	-1.510	-1.475	-40
-30	-1.475	-1.440	-1.405	-1.370	-1.335	-1.299	-1.264	-1.228	-1.192	-1.157	-1.121	-30
-20	-1.121	-1.085	-1.049	-1.013	-0.976	-0.940	-0.904	-0.867	-0.830	-0.794	-0.757	-20
-10	-0.757	-0.720	-0.683	-0.646	-0.608	-0.571	-0.534	-0.496	-0.459	-0.421	-0.383	-10
0	-0.383	-0.345	-0.307	-0.269	-0.231	-0.193	-0.154	-0.116	-0.077	-0.039	0.000	0

TERMOCUPLA

TIPO



Voltaje termoelectrónico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.352	0.391	0
10	0.391	0.431	0.470	0.510	0.549	0.589	0.629	0.669	0.709	0.749	0.790	10
20	0.790	0.830	0.870	0.911	0.951	0.992	1.033	1.074	1.114	1.155	1.196	20
30	1.196	1.238	1.279	1.320	1.362	1.403	1.445	1.486	1.528	1.570	1.612	30
40	1.612	1.654	1.696	1.738	1.780	1.823	1.865	1.908	1.950	1.993	2.036	40
60	2.468	2.512	2.556	2.600	2.643	2.687	2.732	2.776	2.820	2.864	2.909	60
70	2.909	2.953	2.998	3.043	3.087	3.132	3.177	3.222	3.267	3.312	3.358	70
80	3.358	3.403	3.448	3.494	3.539	3.585	3.631	3.677	3.722	3.768	3.814	80
90	3.814	3.860	3.907	3.953	3.999	4.046	4.092	4.138	4.185	4.232	4.279	90
100	4.279	4.325	4.372	4.419	4.466	4.513	4.561	4.608	4.655	4.702	4.750	100
110	4.750	4.798	4.845	4.893	4.941	4.988	5.036	5.084	5.132	5.180	5.228	110
120	5.228	5.277	5.325	5.373	5.422	5.470	5.519	5.567	5.616	5.665	5.714	120
130	5.714	5.763	5.812	5.861	5.910	5.959	6.008	6.057	6.107	6.156	6.206	130
140	6.206	6.255	6.305	6.355	6.404	6.454	6.504	6.554	6.604	6.654	6.704	140
150	6.704	6.754	6.805	6.855	6.905	6.956	7.006	7.057	7.107	7.158	7.209	150
160	7.209	7.260	7.310	7.361	7.412	7.463	7.515	7.566	7.617	7.668	7.720	160
170	7.720	7.771	7.823	7.874	7.926	7.977	8.029	8.081	8.133	8.185	8.237	170
180	8.237	8.289	8.341	8.393	8.445	8.497	8.550	8.602	8.654	8.707	8.759	180
190	8.759	8.812	8.865	8.917	8.970	9.023	9.076	9.129	9.182	9.235	9.288	190
200	9.288	9.341	9.395	9.448	9.501	9.555	9.608	9.662	9.715	9.769	9.822	200
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.352	0.391	0

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
210	9.822	9.876	9.930	9.984	10.038	10.092	10.146	10.200	10.254	10.308	10.362	210
220	10.362	10.417	10.471	10.525	10.580	10.634	10.689	10.743	10.798	10.853	10.907	220
230	10.907	10.962	11.017	11.072	11.127	11.182	11.237	11.292	11.347	11.403	11.458	230
240	11.458	11.513	11.569	11.624	11.680	11.735	11.791	11.846	11.902	11.958	12.013	240
250	12.013	12.069	12.125	12.181	12.237	12.293	12.349	12.405	12.461	12.518	12.574	250
260	12.574	12.630	12.687	12.743	12.799	12.856	12.912	12.969	13.026	13.082	13.139	260
270	13.139	13.196	13.253	13.310	13.366	13.423	13.480	13.537	13.595	13.652	13.709	270
280	13.709	13.766	13.823	13.881	13.938	13.995	14.053	14.110	14.168	14.226	14.283	280
290	14.283	14.341	14.399	14.456	14.514	14.572	14.630	14.688	14.746	14.804	14.862	290
300	14.862	14.920	14.978	15.036	15.095	15.153	15.211	15.270	15.328	15.386	15.445	300
310	15.445	15.503	15.562	15.621	15.679	15.738	15.797	15.856	15.915	15.973	16.032	310
320	16.032	16.091	16.150	16.209	16.268	16.327	16.387	16.446	16.505	16.564	16.624	320
330	16.624	16.683	16.742	16.802	16.861	16.921	16.980	17.040	17.100	17.159	17.219	330
340	17.219	17.279	17.339	17.399	17.458	17.518	17.578	17.638	17.698	17.759	17.819	340
350	17.819	17.879	17.939	17.999	18.060	18.120	18.180	18.241	18.301	18.362	18.422	350
360	18.422	18.483	18.543	18.604	18.665	18.725	18.786	18.847	18.908	18.969	19.030	360
370	19.030	19.091	19.152	19.213	19.274	19.335	19.396	19.457	19.518	19.579	19.641	370
380	19.641	19.702	19.763	19.825	19.886	19.947	20.009	20.070	20.132	20.193	20.255	380
390	20.255	20.317	20.378	20.440	20.502	20.563	20.625	20.687	20.748	20.810	20.872	390

TERMOCUPLA

TIPO

R

Voltaje termoelectrónico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
210	1.558	1.567	1.575	1.584	1.593	1.602	1.611	1.620	1.629	1.639	1.648	210
220	1.648	1.657	1.666	1.675	1.684	1.693	1.702	1.711	1.720	1.729	1.739	220
230	1.739	1.748	1.757	1.766	1.775	1.784	1.794	1.803	1.812	1.821	1.831	230
240	1.831	1.840	1.849	1.858	1.868	1.877	1.886	1.895	1.905	1.914	1.923	240
250	1.923	1.933	1.942	1.951	1.961	1.970	1.980	1.989	1.998	2.008	2.017	250
260	2.017	2.027	2.036	2.046	2.055	2.064	2.074	2.083	2.093	2.102	2.112	260
270	2.112	2.121	2.131	2.140	2.150	2.159	2.169	2.179	2.188	2.198	2.207	270
280	2.207	2.217	2.226	2.236	2.246	2.255	2.265	2.275	2.284	2.294	2.304	280
290	2.304	2.313	2.323	2.333	2.342	2.352	2.362	2.371	2.381	2.391	2.401	290
300	2.401	2.410	2.420	2.430	2.440	2.449	2.459	2.469	2.479	2.488	2.498	300
310	2.498	2.508	2.518	2.528	2.538	2.547	2.557	2.567	2.577	2.587	2.597	310
320	2.597	2.607	2.617	2.626	2.636	2.646	2.656	2.666	2.676	2.686	2.696	320
330	2.696	2.706	2.716	2.726	2.736	2.746	2.756	2.766	2.776	2.786	2.796	330
340	2.796	2.806	2.816	2.826	2.836	2.846	2.856	2.866	2.876	2.886	2.896	340
350	2.896	2.906	2.916	2.926	2.937	2.947	2.957	2.967	2.977	2.987	2.997	350
360	2.997	3.007	3.018	3.028	3.038	3.048	3.058	3.068	3.079	3.089	3.099	360
370	3.099	3.109	3.119	3.130	3.140	3.150	3.160	3.171	3.181	3.191	3.201	370
380	3.201	3.212	3.222	3.232	3.242	3.253	3.263	3.273	3.284	3.294	3.304	380
390	3.304	3.315	3.325	3.335	3.346	3.356	3.366	3.377	3.387	3.397	3.408	390
400	3.408	3.418	3.428	3.439	3.449	3.460	3.470	3.480	3.491	3.501	3.512	400

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
410	3.512	3.522	3.533	3.543	3.553	3.564	3.574	3.585	3.595	3.606	3.616	410
420	3.616	3.627	3.637	3.648	3.658	3.669	3.679	3.690	3.700	3.711	3.721	420
430	3.721	3.732	3.742	3.753	3.764	3.774	3.785	3.795	3.806	3.816	3.827	430
440	3.827	3.838	3.848	3.859	3.869	3.880	3.891	3.901	3.912	3.922	3.933	440
450	3.933	3.944	3.954	3.965	3.976	3.986	3.997	4.008	4.018	4.029	4.040	450
460	4.040	4.050	4.061	4.072	4.083	4.093	4.104	4.115	4.125	4.136	4.147	460
470	4.147	4.158	4.168	4.179	4.190	4.201	4.211	4.222	4.233	4.244	4.255	470
480	4.255	4.265	4.276	4.287	4.298	4.309	4.319	4.330	4.341	4.352	4.363	480
490	4.363	4.373	4.384	4.395	4.406	4.417	4.428	4.439	4.449	4.460	4.471	490
500	4.471	4.482	4.493	4.504	4.515	4.526	4.537	4.548	4.558	4.569	4.580	500
510	4.580	4.591	4.602	4.613	4.624	4.635	4.646	4.657	4.668	4.679	4.690	510
520	4.690	4.701	4.712	4.723	4.734	4.745	4.756	4.767	4.778	4.789	4.800	520
530	4.800	4.811	4.822	4.833	4.844	4.855	4.866	4.877	4.888	4.899	4.910	530
540	4.910	4.922	4.933	4.944	4.955	4.966	4.977	4.988	4.999	5.010	5.021	540
550	5.021	5.033	5.044	5.055	5.066	5.077	5.088	5.099	5.111	5.122	5.133	550
560	5.133	5.144	5.155	5.166	5.178	5.189	5.200	5.211	5.222	5.234	5.245	560
570	5.245	5.256	5.267	5.279	5.290	5.301	5.312	5.323	5.335	5.346	5.357	570
580	5.357	5.369	5.380	5.391	5.402	5.414	5.425	5.436	5.448	5.459	5.470	580
590	5.470	5.481	5.493	5.504	5.515	5.527	5.538	5.549	5.561	5.572	5.583	590
600	5.583	5.595	5.606	5.618	5.629	5.640	5.652	5.663	5.674	5.686	5.697	600

TERMOCUPLA

TIPO

R

Voltaje termoelectrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
610	5.697	5.709	5.720	5.731	5.743	5.754	5.766	5.777	5.789	5.800	5.812	610
620	5.812	5.823	5.834	5.846	5.857	5.869	5.880	5.892	5.903	5.915	5.926	620
630	5.926	5.938	5.949	5.961	5.972	5.984	5.995	6.007	6.018	6.030	6.041	630
640	6.041	6.053	6.065	6.076	6.088	6.099	6.111	6.122	6.134	6.146	6.157	640
650	6.157	6.169	6.180	6.192	6.204	6.215	6.227	6.238	6.250	6.262	6.273	650
660	6.273	6.285	6.297	6.308	6.320	6.332	6.343	6.355	6.367	6.378	6.390	660
670	6.390	6.402	6.413	6.425	6.437	6.448	6.460	6.472	6.484	6.495	6.507	670
680	6.507	6.519	6.531	6.542	6.554	6.566	6.578	6.589	6.601	6.613	6.625	680
690	6.625	6.636	6.648	6.660	6.672	6.684	6.695	6.707	6.719	6.731	6.743	690
700	6.743	6.755	6.766	6.778	6.790	6.802	6.814	6.826	6.838	6.849	6.861	700
710	6.861	6.873	6.885	6.897	6.909	6.921	6.933	6.945	6.956	6.968	6.980	710
720	6.980	6.992	7.004	7.016	7.028	7.040	7.052	7.064	7.076	7.088	7.100	720
730	7.100	7.112	7.124	7.136	7.148	7.160	7.172	7.184	7.196	7.208	7.220	730
740	7.220	7.232	7.244	7.256	7.268	7.280	7.292	7.304	7.316	7.328	7.340	740
750	7.340	7.352	7.364	7.376	7.389	7.401	7.413	7.425	7.437	7.449	7.461	750
760	7.461	7.473	7.485	7.498	7.510	7.522	7.534	7.546	7.558	7.570	7.583	760
770	7.583	7.595	7.607	7.619	7.631	7.644	7.656	7.668	7.680	7.692	7.705	770
780	7.705	7.717	7.729	7.741	7.753	7.766	7.778	7.790	7.802	7.815	7.827	780
790	7.827	7.839	7.851	7.864	7.876	7.888	7.901	7.913	7.925	7.938	7.950	790
800	7.950	7.962	7.974	7.987	7.999	8.011	8.024	8.036	8.048	8.061	8.073	800

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
810	8.073	8.086	8.098	8.110	8.123	8.135	8.147	8.160	8.172	8.185	8.197	810
820	8.197	8.209	8.222	8.234	8.247	8.259	8.272	8.284	8.296	8.309	8.321	820
830	8.321	8.334	8.346	8.359	8.371	8.384	8.396	8.409	8.421	8.434	8.446	830
840	8.446	8.459	8.471	8.484	8.496	8.509	8.521	8.534	8.546	8.559	8.571	840
850	8.571	8.584	8.597	8.609	8.622	8.634	8.647	8.659	8.672	8.685	8.697	850
860	8.697	8.710	8.722	8.735	8.748	8.760	8.773	8.785	8.798	8.811	8.823	860
870	8.823	8.836	8.849	8.861	8.874	8.887	8.899	8.912	8.925	8.937	8.950	870
880	8.950	8.963	8.975	8.988	9.001	9.014	9.026	9.039	9.052	9.065	9.077	880
890	9.077	9.090	9.103	9.115	9.128	9.141	9.154	9.167	9.179	9.192	9.205	890
900	9.205	9.218	9.230	9.243	9.256	9.269	9.282	9.294	9.307	9.320	9.333	900
910	9.333	9.346	9.359	9.371	9.384	9.397	9.410	9.423	9.436	9.449	9.461	910
920	9.461	9.474	9.487	9.500	9.513	9.526	9.539	9.552	9.565	9.578	9.590	920
930	9.590	9.603	9.616	9.629	9.642	9.655	9.668	9.681	9.694	9.707	9.720	930
940	9.720	9.733	9.746	9.759	9.772	9.785	9.798	9.811	9.824	9.837	9.850	940
950	9.850	9.863	9.876	9.889	9.902	9.915	9.928	9.941	9.954	9.967	9.980	950
960	9.980	9.993	10.006	10.019	10.032	10.046	10.059	10.072	10.085	10.098	10.111	960
970	10.111	10.124	10.137	10.150	10.163	10.177	10.190	10.203	10.216	10.229	10.242	970
980	10.242	10.255	10.268	10.282	10.295	10.308	10.321	10.334	10.347	10.361	10.374	980
990	10.374	10.387	10.400	10.413	10.427	10.440	10.453	10.466	10.480	10.493	10.506	990
1000	10.506	10.519	10.532	10.546	10.559	10.572	10.585	10.599	10.612	10.625	10.638	1000



TERMOCUPLA

TIPO

R

Voltaje termoeléctrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
1010	10.638	10.652	10.665	10.678	10.692	10.705	10.718	10.731	10.745	10.758	10.771	1010
1020	10.771	10.785	10.798	10.811	10.825	10.838	10.851	10.865	10.878	10.891	10.905	1020
1030	10.905	10.918	10.932	10.945	10.958	10.972	10.985	10.998	11.012	11.025	11.039	1030
1040	11.039	11.052	11.065	11.079	11.092	11.106	11.119	11.132	11.146	11.159	11.173	1040
1050	11.173	11.186	11.200	11.213	11.227	11.240	11.253	11.267	11.280	11.294	11.307	1050
1060	11.307	11.321	11.334	11.348	11.361	11.375	11.388	11.402	11.415	11.429	11.442	1060
1070	11.442	11.456	11.469	11.483	11.496	11.510	11.524	11.537	11.551	11.564	11.578	1070
1080	11.578	11.591	11.605	11.618	11.632	11.646	11.659	11.673	11.686	11.700	11.714	1080
1090	11.714	11.727	11.741	11.754	11.768	11.782	11.795	11.809	11.822	11.836	11.850	1090
1100	11.850	11.863	11.877	11.891	11.904	11.918	11.931	11.945	11.959	11.972	11.986	1100
1110	11.986	12.000	12.013	12.027	12.041	12.054	12.068	12.082	12.096	12.109	12.123	1110
1120	12.123	12.137	12.150	12.164	12.178	12.191	12.205	12.219	12.233	12.246	12.260	1120
1130	12.260	12.274	12.288	12.301	12.315	12.329	12.342	12.356	12.370	12.384	12.397	1130
1140	12.397	12.411	12.425	12.439	12.453	12.466	12.480	12.494	12.508	12.521	12.535	1140
1150	12.535	12.549	12.563	12.577	12.590	12.604	12.618	12.632	12.646	12.659	12.673	1150
1160	12.673	12.687	12.701	12.715	12.729	12.742	12.756	12.770	12.784	12.798	12.812	1160
1170	12.812	12.825	12.839	12.853	12.867	12.881	12.895	12.909	12.922	12.936	12.950	1170
1180	12.950	12.964	12.978	12.992	13.006	13.019	13.033	13.047	13.061	13.075	13.089	1180
1190	13.089	13.103	13.117	13.131	13.145	13.158	13.172	13.186	13.200	13.214	13.228	1190
1200	13.228	13.242	13.256	13.270	13.284	13.298	13.311	13.325	13.339	13.353	13.367	1200
1010	10.638	10.652	10.665	10.678	10.692	10.705	10.718	10.731	10.745	10.758	10.771	1010

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
1210	13.367	13.381	13.395	13.409	13.423	13.437	13.451	13.465	13.479	13.493	13.507	1210
1220	13.507	13.521	13.535	13.549	13.563	13.577	13.590	13.604	13.618	13.632	13.646	1220
1230	13.646	13.660	13.674	13.688	13.702	13.716	13.730	13.744	13.758	13.772	13.786	1230
1240	13.786	13.800	13.814	13.828	13.842	13.856	13.870	13.884	13.898	13.912	13.926	1240
1250	13.926	13.940	13.954	13.968	13.982	13.996	14.010	14.024	14.038	14.052	14.066	1250
1260	14.066	14.081	14.095	14.109	14.123	14.137	14.151	14.165	14.179	14.193	14.207	1260
1270	14.207	14.221	14.235	14.249	14.263	14.277	14.291	14.305	14.319	14.333	14.347	1270
1280	14.347	14.361	14.375	14.390	14.404	14.418	14.432	14.446	14.460	14.474	14.488	1280
1290	14.488	14.502	14.516	14.530	14.544	14.558	14.572	14.586	14.601	14.615	14.629	1290
1300	14.629	14.643	14.657	14.671	14.685	14.699	14.713	14.727	14.741	14.755	14.770	1300
1310	14.770	14.784	14.798	14.812	14.826	14.840	14.854	14.868	14.882	14.896	14.911	1310
1320	14.911	14.925	14.939	14.953	14.967	14.981	14.995	15.009	15.023	15.037	15.052	1320
1330	15.052	15.066	15.080	15.094	15.108	15.122	15.136	15.150	15.164	15.179	15.193	1330
1340	15.193	15.207	15.221	15.235	15.249	15.263	15.277	15.291	15.306	15.320	15.334	1340
1350	15.334	15.348	15.362	15.376	15.390	15.404	15.419	15.433	15.447	15.461	15.475	1350
1360	15.475	15.489	15.503	15.517	15.531	15.546	15.560	15.574	15.588	15.602	15.616	1360
1370	15.616	15.630	15.645	15.659	15.673	15.687	15.701	15.715	15.729	15.743	15.758	1370
1380	15.758	15.772	15.786	15.800	15.814	15.828	15.842	15.856	15.871	15.885	15.899	1380
1390	15.899	15.913	15.927	15.941	15.955	15.969	15.984	15.998	16.012	16.026	16.040	1390
1400	16.040	16.054	16.068	16.082	16.097	16.111	16.125	16.139	16.153	16.167	16.181	1400

TERMOCUPLA

TIPO

R

Voltaje termoeléctrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
1410	16.181	16.196	16.210	16.224	16.238	16.252	16.266	16.280	16.294	16.309	16.323	1410
1420	16.323	16.337	16.351	16.365	16.379	16.393	16.407	16.422	16.436	16.450	16.464	1420
1430	16.464	16.478	16.492	16.506	16.520	16.534	16.549	16.563	16.577	16.591	16.605	1430
1440	16.605	16.619	16.633	16.647	16.662	16.676	16.690	16.704	16.718	16.732	16.746	1440
1450	16.746	16.760	16.774	16.789	16.803	16.817	16.831	16.845	16.859	16.873	16.887	1450
1460	16.887	16.901	16.915	16.930	16.944	16.958	16.972	16.986	17.000	17.014	17.028	1460
1470	17.028	17.042	17.056	17.071	17.085	17.099	17.113	17.127	17.141	17.155	17.169	1470
1480	17.169	17.183	17.197	17.211	17.225	17.240	17.254	17.268	17.282	17.296	17.310	1480
1490	17.310	17.324	17.338	17.352	17.366	17.380	17.394	17.408	17.423	17.437	17.451	1490
1500	17.451	17.465	17.479	17.493	17.507	17.521	17.535	17.549	17.563	17.577	17.591	1500
1510	17.591	17.605	17.619	17.633	17.647	17.661	17.676	17.690	17.704	17.718	17.732	1510
1520	17.732	17.746	17.760	17.774	17.788	17.802	17.816	17.830	17.844	17.858	17.872	1520
1530	17.872	17.886	17.900	17.914	17.928	17.942	17.956	17.970	17.984	17.998	18.012	1530
1540	18.012	18.026	18.040	18.054	18.068	18.082	18.096	18.110	18.124	18.138	18.152	1540
1550	18.152	18.166	18.180	18.194	18.208	18.222	18.236	18.250	18.264	18.278	18.292	1550
1560	18.292	18.306	18.320	18.334	18.348	18.362	18.376	18.390	18.404	18.417	18.431	1560
1570	18.431	18.445	18.459	18.473	18.487	18.501	18.515	18.529	18.543	18.557	18.571	1570
1580	18.571	18.585	18.599	18.613	18.627	18.640	18.654	18.668	18.682	18.696	18.710	1580
1590	18.710	18.724	18.738	18.752	18.766	18.779	18.793	18.807	18.821	18.835	18.849	1590
1600	18.849	18.863	18.877	18.891	18.904	18.918	18.932	18.946	18.960	18.974	18.988	1600
1410	16.181	16.196	16.210	16.224	16.238	16.252	16.266	16.280	16.294	16.309	16.323	1410

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
1610	18.988	19.002	19.015	19.029	19.043	19.057	19.071	19.085	19.098	19.112	19.126	1610
1620	19.126	19.140	19.154	19.168	19.181	19.195	19.209	19.223	19.237	19.250	19.264	1620
1630	19.264	19.278	19.292	19.306	19.319	19.333	19.347	19.361	19.375	19.388	19.402	1630
1640	19.402	19.416	19.430	19.444	19.457	19.471	19.485	19.499	19.512	19.526	19.540	1640
1650	19.540	19.554	19.567	19.581	19.595	19.609	19.622	19.636	19.650	19.663	19.677	1650
1660	19.677	19.691	19.705	19.718	19.732	19.746	19.759	19.773	19.787	19.800	19.814	1660
1670	19.814	19.828	19.841	19.855	19.869	19.882	19.896	19.910	19.923	19.937	19.951	1670
1680	19.951	19.964	19.978	19.992	20.005	20.019	20.032	20.046	20.060	20.073	20.087	1680
1690	20.087	20.100	20.114	20.127	20.141	20.154	20.168	20.181	20.195	20.208	20.222	1690
1700	20.222	20.235	20.249	20.262	20.275	20.289	20.302	20.316	20.329	20.342	20.356	1700
1710	20.356	20.369	20.382	20.396	20.409	20.422	20.436	20.449	20.462	20.475	20.488	1710
1720	20.488	20.502	20.515	20.528	20.541	20.554	20.567	20.581	20.594	20.607	20.620	1720
1730	20.620	20.633	20.646	20.659	20.672	20.685	20.698	20.711	20.724	20.736	20.749	1730
1740	20.749	20.762	20.775	20.788	20.801	20.813	20.826	20.839	20.852	20.864	20.877	1740
1750	20.877	20.890	20.902	20.915	20.928	20.940	20.953	20.965	20.978	20.990	21.003	1750
1760	21.003	21.015	21.027	21.040	21.052	21.065	21.077	21.089	21.101			1760

TERMOCUPLA

TIPO

S

Voltaje termoeléctrico en milivoltios (mV)

°C	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	°C
-40	-0.236	-0.232	-0.228	-0.224	-0.219	-0.215	-0.211	-0.207	-0.203	-0.199	-0.194	-40
-30	-0.194	-0.190	-0.186	-0.181	-0.177	-0.173	-0.168	-0.164	-0.159	-0.155	-0.150	-30
-20	-0.150	-0.146	-0.141	-0.136	-0.132	-0.127	-0.122	-0.117	-0.113	-0.108	-0.103	-20
-10	-0.103	-0.098	-0.093	-0.088	-0.083	-0.078	-0.073	-0.068	-0.063	-0.058	-0.053	-10
0	-0.053	-0.048	-0.042	-0.037	-0.032	-0.027	-0.021	-0.016	-0.011	-0.005	0.000	0
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
0	0.000	0.005	0.011	0.016	0.022	0.027	0.033	0.038	0.044	0.050	0.055	0
10	0.055	0.061	0.067	0.072	0.078	0.084	0.090	0.095	0.101	0.107	0.113	10
20	0.113	0.119	0.125	0.131	0.137	0.143	0.149	0.155	0.161	0.167	0.173	20
30	0.173	0.179	0.185	0.191	0.197	0.204	0.210	0.216	0.222	0.229	0.235	30
40	0.235	0.241	0.248	0.254	0.260	0.267	0.273	0.280	0.286	0.292	0.299	40
50	0.299	0.305	0.312	0.319	0.325	0.332	0.338	0.345	0.352	0.358	0.365	50
60	0.365	0.372	0.378	0.385	0.392	0.399	0.405	0.412	0.419	0.426	0.433	60
70	0.433	0.440	0.446	0.453	0.460	0.467	0.474	0.481	0.488	0.495	0.502	70
80	0.502	0.509	0.516	0.523	0.530	0.538	0.545	0.552	0.559	0.566	0.573	80
90	0.573	0.580	0.588	0.595	0.602	0.609	0.617	0.624	0.631	0.639	0.646	90
100	0.646	0.653	0.661	0.668	0.675	0.683	0.690	0.698	0.705	0.713	0.720	100
110	0.720	0.727	0.735	0.743	0.750	0.758	0.765	0.773	0.780	0.788	0.795	110
120	0.795	0.803	0.811	0.818	0.826	0.834	0.841	0.849	0.857	0.865	0.872	120
130	0.872	0.880	0.888	0.896	0.903	0.911	0.919	0.927	0.935	0.942	0.950	130
140	0.950	0.958	0.966	0.974	0.982	0.990	0.998	1.006	1.013	1.021	1.029	140
150	1.029	1.037	1.045	1.053	1.061	1.069	1.077	1.085	1.094	1.102	1.110	150
160	1.110	1.118	1.126	1.134	1.142	1.150	1.158	1.167	1.175	1.183	1.191	160
170	1.191	1.199	1.207	1.216	1.224	1.232	1.240	1.249	1.257	1.265	1.273	170
180	1.273	1.282	1.290	1.298	1.307	1.315	1.323	1.332	1.340	1.348	1.357	180
190	1.357	1.365	1.373	1.382	1.390	1.399	1.407	1.415	1.424	1.432	1.441	190
200	1.441	1.449	1.458	1.466	1.475	1.483	1.492	1.500	1.509	1.517	1.526	200

TERMOCUPLA

TIPO

S

Voltaje termoelectrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
210	1.526	1.534	1.543	1.551	1.560	1.569	1.577	1.586	1.594	1.603	1.612	210
220	1.612	1.620	1.629	1.638	1.646	1.655	1.663	1.672	1.681	1.690	1.698	220
230	1.698	1.707	1.716	1.724	1.733	1.742	1.751	1.759	1.768	1.777	1.786	230
240	1.786	1.794	1.803	1.812	1.821	1.829	1.838	1.847	1.856	1.865	1.874	240
250	1.874	1.882	1.891	1.900	1.909	1.918	1.927	1.936	1.944	1.953	1.962	250
260	1.962	1.971	1.980	1.989	1.998	2.007	2.016	2.025	2.034	2.043	2.052	260
270	2.052	2.061	2.070	2.078	2.087	2.096	2.105	2.114	2.123	2.132	2.141	270
280	2.141	2.151	2.160	2.169	2.178	2.187	2.196	2.205	2.214	2.223	2.232	280
290	2.232	2.241	2.250	2.259	2.268	2.277	2.287	2.296	2.305	2.314	2.323	290
300	2.323	2.332	2.341	2.350	2.360	2.369	2.378	2.387	2.396	2.405	2.415	300
310	2.415	2.424	2.433	2.442	2.451	2.461	2.470	2.479	2.488	2.497	2.507	310
320	2.507	2.516	2.525	2.534	2.544	2.553	2.562	2.571	2.581	2.590	2.599	320
330	2.599	2.609	2.618	2.627	2.636	2.646	2.655	2.664	2.674	2.683	2.692	330
340	2.692	2.702	2.711	2.720	2.730	2.739	2.748	2.758	2.767	2.776	2.786	340
350	2.786	2.795	2.805	2.814	2.823	2.833	2.842	2.851	2.861	2.870	2.880	350
360	2.880	2.889	2.899	2.908	2.917	2.927	2.936	2.946	2.955	2.965	2.974	360
370	2.974	2.983	2.993	3.002	3.012	3.021	3.031	3.040	3.050	3.059	3.069	370
380	3.069	3.078	3.088	3.097	3.107	3.116	3.126	3.135	3.145	3.154	3.164	380
390	3.164	3.173	3.183	3.192	3.202	3.212	3.221	3.231	3.240	3.250	3.259	390
400	3.259	3.269	3.279	3.288	3.298	3.307	3.317	3.326	3.336	3.346	3.355	400

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
410	3.355	3.365	3.374	3.384	3.394	3.403	3.413	3.423	3.432	3.442	3.451	410
420	3.451	3.461	3.471	3.480	3.490	3.500	3.509	3.519	3.529	3.538	3.548	420
430	3.548	3.558	3.567	3.577	3.587	3.596	3.606	3.616	3.626	3.635	3.645	430
440	3.645	3.655	3.664	3.674	3.684	3.694	3.703	3.713	3.723	3.732	3.742	440
450	3.742	3.752	3.762	3.771	3.781	3.791	3.801	3.810	3.820	3.830	3.840	450
460	3.840	3.850	3.859	3.869	3.879	3.889	3.898	3.908	3.918	3.928	3.938	460
470	3.938	3.947	3.957	3.967	3.977	3.987	3.997	4.006	4.016	4.026	4.036	470
480	4.036	4.046	4.056	4.065	4.075	4.085	4.095	4.105	4.115	4.125	4.134	480
490	4.134	4.144	4.154	4.164	4.174	4.184	4.194	4.204	4.213	4.223	4.233	490
500	4.233	4.243	4.253	4.263	4.273	4.283	4.293	4.303	4.313	4.323	4.332	500
510	4.332	4.342	4.352	4.362	4.372	4.382	4.392	4.402	4.412	4.422	4.432	510
520	4.432	4.442	4.452	4.462	4.472	4.482	4.492	4.502	4.512	4.522	4.532	520
530	4.532	4.542	4.552	4.562	4.572	4.582	4.592	4.602	4.612	4.622	4.632	530
540	4.632	4.642	4.652	4.662	4.672	4.682	4.692	4.702	4.712	4.722	4.732	540
550	4.732	4.742	4.752	4.762	4.772	4.782	4.793	4.803	4.813	4.823	4.833	550
560	4.833	4.843	4.853	4.863	4.873	4.883	4.893	4.904	4.914	4.924	4.934	560
570	4.934	4.944	4.954	4.964	4.974	4.984	4.995	5.005	5.015	5.025	5.035	570
580	5.035	5.045	5.055	5.066	5.076	5.086	5.096	5.106	5.116	5.127	5.137	580
590	5.137	5.147	5.157	5.167	5.178	5.188	5.198	5.208	5.218	5.228	5.239	590
600	5.239	5.249	5.259	5.269	5.280	5.290	5.300	5.310	5.320	5.331	5.341	600

TERMOCUPLA

TIPO

S

Voltaje termoeléctrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
610	5.341	5.351	5.361	5.372	5.382	5.392	5.402	5.413	5.423	5.433	5.443	610
620	5.443	5.454	5.464	5.474	5.485	5.495	5.505	5.515	5.526	5.536	5.546	620
630	5.546	5.557	5.567	5.577	5.588	5.598	5.608	5.618	5.629	5.639	5.649	630
640	5.649	5.660	5.670	5.680	5.691	5.701	5.712	5.722	5.732	5.743	5.753	640
650	5.753	5.763	5.774	5.784	5.794	5.805	5.815	5.826	5.836	5.846	5.857	650
660	5.857	5.867	5.878	5.888	5.898	5.909	5.919	5.930	5.940	5.950	5.961	660
670	5.961	5.971	5.982	5.992	6.003	6.013	6.024	6.034	6.044	6.055	6.065	670
680	6.065	6.076	6.086	6.097	6.107	6.118	6.128	6.139	6.149	6.160	6.170	680
690	6.170	6.181	6.191	6.202	6.212	6.223	6.233	6.244	6.254	6.265	6.275	690
700	6.275	6.286	6.296	6.307	6.317	6.328	6.338	6.349	6.360	6.370	6.381	700
710	6.381	6.391	6.402	6.412	6.423	6.434	6.444	6.455	6.465	6.476	6.486	710
720	6.486	6.497	6.508	6.518	6.529	6.539	6.550	6.561	6.571	6.582	6.593	720
730	6.593	6.603	6.614	6.624	6.635	6.646	6.656	6.667	6.678	6.688	6.699	730
740	6.699	6.710	6.720	6.731	6.742	6.752	6.763	6.774	6.784	6.795	6.806	740
750	6.806	6.817	6.827	6.838	6.849	6.859	6.870	6.881	6.892	6.902	6.913	750
760	6.913	6.924	6.934	6.945	6.956	6.967	6.977	6.988	6.999	7.010	7.020	760
770	7.020	7.031	7.042	7.053	7.064	7.074	7.085	7.096	7.107	7.117	7.128	770
780	7.128	7.139	7.150	7.161	7.172	7.182	7.193	7.204	7.215	7.226	7.236	780
790	7.236	7.247	7.258	7.269	7.280	7.291	7.302	7.312	7.323	7.334	7.345	790
800	7.345	7.356	7.367	7.378	7.388	7.399	7.410	7.421	7.432	7.443	7.454	800

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
810	7.454	7.465	7.476	7.487	7.497	7.508	7.519	7.530	7.541	7.552	7.563	810
820	7.563	7.574	7.585	7.596	7.607	7.618	7.629	7.640	7.651	7.662	7.673	820
830	7.673	7.684	7.695	7.706	7.717	7.728	7.739	7.750	7.761	7.772	7.783	830
840	7.783	7.794	7.805	7.816	7.827	7.838	7.849	7.860	7.871	7.882	7.893	840
850	7.893	7.904	7.915	7.926	7.937	7.948	7.959	7.970	7.981	7.992	8.003	850
860	8.003	8.014	8.026	8.037	8.048	8.059	8.070	8.081	8.092	8.103	8.114	860
870	8.114	8.125	8.137	8.148	8.159	8.170	8.181	8.192	8.203	8.214	8.226	870
880	8.226	8.237	8.248	8.259	8.270	8.281	8.293	8.304	8.315	8.326	8.337	880
890	8.337	8.348	8.360	8.371	8.382	8.393	8.404	8.416	8.427	8.438	8.449	890
900	8.449	8.460	8.472	8.483	8.494	8.505	8.517	8.528	8.539	8.550	8.562	900
910	8.562	8.573	8.584	8.595	8.607	8.618	8.629	8.640	8.652	8.663	8.674	910
920	8.674	8.685	8.697	8.708	8.719	8.731	8.742	8.753	8.765	8.776	8.787	920
930	8.787	8.798	8.810	8.821	8.832	8.844	8.855	8.866	8.878	8.889	8.900	930
940	8.900	8.912	8.923	8.935	8.946	8.957	8.969	8.980	8.991	9.003	9.014	940
950	9.014	9.025	9.037	9.048	9.060	9.071	9.082	9.094	9.105	9.117	9.128	950
960	9.128	9.139	9.151	9.162	9.174	9.185	9.197	9.208	9.219	9.231	9.242	960
970	9.242	9.254	9.265	9.277	9.288	9.300	9.311	9.323	9.334	9.345	9.357	970
980	9.357	9.368	9.380	9.391	9.403	9.414	9.426	9.437	9.449	9.460	9.472	980
990	9.472	9.483	9.495	9.506	9.518	9.529	9.541	9.552	9.564	9.576	9.587	990
1000	9.587	9.599	9.610	9.622	9.633	9.645	9.656	9.668	9.680	9.691	9.703	1000

TERMOCUPLA

TIPO

S

Voltaje termoeléctrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
1010	9.703	9.714	9.726	9.737	9.749	9.761	9.772	9.784	9.795	9.807	9.819	1010
1020	9.819	9.830	9.842	9.853	9.865	9.877	9.888	9.900	9.911	9.923	9.935	1020
1030	9.935	9.946	9.958	9.970	9.981	9.993	10.005	10.016	10.028	10.040	10.051	1030
1040	10.051	10.063	10.075	10.086	10.098	10.110	10.121	10.133	10.145	10.156	10.168	1040
1050	10.168	10.180	10.191	10.203	10.215	10.227	10.238	10.250	10.262	10.273	10.285	1050
1060	10.285	10.297	10.309	10.320	10.332	10.344	10.356	10.367	10.379	10.391	10.403	1060
1070	10.403	10.414	10.426	10.438	10.450	10.461	10.473	10.485	10.497	10.509	10.520	1070
1080	10.520	10.532	10.544	10.556	10.567	10.579	10.591	10.603	10.615	10.626	10.638	1080
1090	10.638	10.650	10.662	10.674	10.686	10.697	10.709	10.721	10.733	10.745	10.757	1090
1100	10.757	10.768	10.780	10.792	10.804	10.816	10.828	10.839	10.851	10.863	10.875	1100
1110	10.875	10.887	10.899	10.911	10.922	10.934	10.946	10.958	10.970	10.982	10.994	1110
1120	10.994	11.006	11.017	11.029	11.041	11.053	11.065	11.077	11.089	11.101	11.113	1120
1130	11.113	11.125	11.136	11.148	11.160	11.172	11.184	11.196	11.208	11.220	11.232	1130
1140	11.232	11.244	11.256	11.268	11.280	11.291	11.303	11.315	11.327	11.339	11.351	1140
1150	11.351	11.363	11.375	11.387	11.399	11.411	11.423	11.435	11.447	11.459	11.471	1150
1160	11.471	11.483	11.495	11.507	11.519	11.531	11.542	11.554	11.566	11.578	11.590	1160
1170	11.590	11.602	11.614	11.626	11.638	11.650	11.662	11.674	11.686	11.698	11.710	1170
1180	11.710	11.722	11.734	11.746	11.758	11.770	11.782	11.794	11.806	11.818	11.830	1180
1190	11.830	11.842	11.854	11.866	11.878	11.890	11.902	11.914	11.926	11.939	11.951	1190
1200	11.951	11.963	11.975	11.987	11.999	12.011	12.023	12.035	12.047	12.059	12.071	1200

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
1210	12.071	12.083	12.095	12.107	12.119	12.131	12.143	12.155	12.167	12.179	12.191	1210
1220	12.191	12.203	12.216	12.228	12.240	12.252	12.264	12.276	12.288	12.300	12.312	1220
1230	12.312	12.324	12.336	12.348	12.360	12.372	12.384	12.397	12.409	12.421	12.433	1230
1240	12.433	12.445	12.457	12.469	12.481	12.493	12.505	12.517	12.529	12.542	12.554	1240
1250	12.554	12.566	12.578	12.590	12.602	12.614	12.626	12.638	12.650	12.662	12.675	1250
1260	12.675	12.687	12.699	12.711	12.723	12.735	12.747	12.759	12.771	12.783	12.796	1260
1270	12.796	12.808	12.820	12.832	12.844	12.856	12.868	12.880	12.892	12.905	12.917	1270
1280	12.917	12.929	12.941	12.953	12.965	12.977	12.989	13.001	13.014	13.026	13.038	1280
1290	13.038	13.050	13.062	13.074	13.086	13.098	13.111	13.123	13.135	13.147	13.159	1290
1300	13.159	13.171	13.183	13.195	13.208	13.220	13.232	13.244	13.256	13.268	13.280	1300
1310	13.280	13.292	13.305	13.317	13.329	13.341	13.353	13.365	13.377	13.390	13.402	1310
1320	13.402	13.414	13.426	13.438	13.450	13.462	13.474	13.487	13.499	13.511	13.523	1320
1330	13.523	13.535	13.547	13.559	13.572	13.584	13.596	13.608	13.620	13.632	13.644	1330
1340	13.644	13.657	13.669	13.681	13.693	13.705	13.717	13.729	13.742	13.754	13.766	1340
1350	13.766	13.778	13.790	13.802	13.814	13.826	13.839	13.851	13.863	13.875	13.887	1350
1360	13.887	13.899	13.911	13.924	13.936	13.948	13.960	13.972	13.984	13.996	14.009	1360
1370	14.009	14.021	14.033	14.045	14.057	14.069	14.081	14.094	14.106	14.118	14.130	1370
1380	14.130	14.142	14.154	14.166	14.178	14.191	14.203	14.215	14.227	14.239	14.251	1380
1390	14.251	14.263	14.276	14.288	14.300	14.312	14.324	14.336	14.348	14.360	14.373	1390
1400	14.373	14.385	14.397	14.409	14.421	14.433	14.445	14.457	14.470	14.482	14.494	1400



TERMOCUPLA

TIPO

S

Voltaje termoeléctrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
1410	14.494	14.506	14.518	14.530	14.542	14.554	14.567	14.579	14.591	14.603	14.615	1410
1420	14.615	14.627	14.639	14.651	14.664	14.676	14.688	14.700	14.712	14.724	14.736	1420
1430	14.736	14.748	14.760	14.773	14.785	14.797	14.809	14.821	14.833	14.845	14.857	1430
1440	14.857	14.869	14.881	14.894	14.906	14.918	14.930	14.942	14.954	14.966	14.978	1440
1450	14.978	14.990	15.002	15.015	15.027	15.039	15.051	15.063	15.075	15.087	15.099	1450
1460	15.099	15.111	15.123	15.135	15.148	15.160	15.172	15.184	15.196	15.208	15.220	1460
1470	15.220	15.232	15.244	15.256	15.268	15.280	15.292	15.304	15.317	15.329	15.341	1470
1480	15.341	15.353	15.365	15.377	15.389	15.401	15.413	15.425	15.437	15.449	15.461	1480
1490	15.461	15.473	15.485	15.497	15.509	15.521	15.534	15.546	15.558	15.570	15.582	1490
1500	15.582	15.594	15.606	15.618	15.630	15.642	15.654	15.666	15.678	15.690	15.702	1500
1510	15.702	15.714	15.726	15.738	15.750	15.762	15.774	15.786	15.798	15.810	15.822	1510
1520	15.822	15.834	15.846	15.858	15.870	15.882	15.894	15.906	15.918	15.930	15.942	1520
1530	15.942	15.954	15.966	15.978	15.990	16.002	16.014	16.026	16.038	16.050	16.062	1530
1540	16.062	16.074	16.086	16.098	16.110	16.122	16.134	16.146	16.158	16.170	16.182	1540
1550	16.182	16.194	16.206	16.218	16.229	16.241	16.253	16.265	16.277	16.289	16.301	1550
1560	16.301	16.313	16.325	16.337	16.349	16.361	16.373	16.385	16.396	16.408	16.420	1560
1570	16.420	16.432	16.444	16.456	16.468	16.480	16.492	16.504	16.516	16.527	16.539	1570
1580	16.539	16.551	16.563	16.575	16.587	16.599	16.611	16.623	16.634	16.646	16.658	1580
1590	16.658	16.670	16.682	16.694	16.706	16.718	16.729	16.741	16.753	16.765	16.777	1590
1600	16.777	16.789	16.801	16.812	16.824	16.836	16.848	16.860	16.872	16.883	16.895	1600

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
1610	16.895	16.907	16.919	16.931	16.943	16.954	16.966	16.978	16.990	17.002	17.013	1610
1620	17.013	17.025	17.037	17.049	17.061	17.072	17.084	17.096	17.108	17.120	17.131	1620
1630	17.131	17.143	17.155	17.167	17.178	17.190	17.202	17.214	17.225	17.237	17.249	1630
1640	17.249	17.261	17.272	17.284	17.296	17.308	17.319	17.331	17.343	17.355	17.366	1640
1650	17.366	17.378	17.390	17.401	17.413	17.425	17.437	17.448	17.460	17.472	17.483	1650
1660	17.483	17.495	17.507	17.518	17.530	17.542	17.553	17.565	17.577	17.588	17.600	1660
1670	17.600	17.612	17.623	17.635	17.647	17.658	17.670	17.682	17.693	17.705	17.717	1670
1680	17.717	17.728	17.740	17.751	17.763	17.775	17.786	17.798	17.809	17.821	17.832	1680
1690	17.832	17.844	17.855	17.867	17.878	17.890	17.901	17.913	17.924	17.936	17.947	1690
1700	17.947	17.959	17.970	17.982	17.993	18.004	18.016	18.027	18.039	18.050	18.061	1700
1710	18.061	18.073	18.084	18.095	18.107	18.118	18.129	18.140	18.152	18.163	18.174	1710
1720	18.174	18.185	18.196	18.208	18.219	18.230	18.241	18.252	18.263	18.274	18.285	1720
1730	18.285	18.297	18.308	18.319	18.330	18.341	18.352	18.362	18.373	18.384	18.395	1730
1740	18.395	18.406	18.417	18.428	18.439	18.449	18.460	18.471	18.482	18.493	18.503	1740
1750	18.503	18.514	18.525	18.535	18.546	18.557	18.567	18.578	18.588	18.599	18.609	1750
1760	18.609	18.620	18.630	18.641	18.651	18.661	18.672	18.682	18.693			1760

TERMOCUPLA

TIPO

B

Voltaje termoelectrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
0	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002	0
10	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	10
20	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	20
30	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000	30
40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	40
50	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006	50
60	0.006	0.007	0.007	0.008	0.008	0.009	0.009	0.010	0.010	0.011	0.011	60
70	0.011	0.012	0.012	0.013	0.014	0.014	0.015	0.015	0.016	0.017	0.017	70
80	0.017	0.018	0.019	0.020	0.020	0.021	0.022	0.022	0.023	0.024	0.025	80
90	0.025	0.026	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.031	0.032	0.033	90
100	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	100
110	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053	110
120	0.053	0.055	0.056	0.057	0.058	0.059	0.060	0.062	0.063	0.064	0.065	120
130	0.065	0.066	0.068	0.069	0.070	0.072	0.073	0.074	0.075	0.077	0.078	130
140	0.078	0.079	0.081	0.082	0.084	0.085	0.086	0.088	0.089	0.091	0.092	140
150	0.092	0.094	0.095	0.096	0.098	0.099	0.101	0.102	0.104	0.106	0.107	150
160	0.107	0.109	0.110	0.112	0.113	0.115	0.117	0.118	0.120	0.122	0.123	160
170	0.123	0.125	0.127	0.128	0.130	0.132	0.134	0.135	0.137	0.139	0.141	170
180	0.141	0.142	0.144	0.146	0.148	0.150	0.151	0.153	0.155	0.157	0.159	180
190	0.159	0.161	0.163	0.165	0.166	0.168	0.170	0.172	0.174	0.176	0.178	190
200	0.178	0.180	0.182	0.184	0.186	0.188	0.190	0.192	0.195	0.197	0.199	200

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
210	0.199	0.201	0.203	0.205	0.207	0.209	0.212	0.214	0.216	0.218	0.220	210
220	0.220	0.222	0.225	0.227	0.229	0.231	0.234	0.236	0.238	0.241	0.243	220
230	0.243	0.245	0.248	0.250	0.252	0.255	0.257	0.259	0.262	0.264	0.267	230
240	0.267	0.269	0.271	0.274	0.276	0.279	0.281	0.284	0.286	0.289	0.291	240
250	0.291	0.294	0.296	0.299	0.301	0.304	0.307	0.309	0.312	0.314	0.317	250
260	0.317	0.320	0.322	0.325	0.328	0.330	0.333	0.336	0.338	0.341	0.344	260
270	0.344	0.347	0.349	0.352	0.355	0.358	0.360	0.363	0.366	0.369	0.372	270
280	0.372	0.375	0.377	0.380	0.383	0.386	0.389	0.392	0.395	0.398	0.401	280
290	0.401	0.404	0.407	0.410	0.413	0.416	0.419	0.422	0.425	0.428	0.431	290
300	0.431	0.434	0.437	0.440	0.443	0.446	0.449	0.452	0.455	0.458	0.462	300
310	0.462	0.465	0.468	0.471	0.474	0.478	0.481	0.484	0.487	0.490	0.494	310
320	0.494	0.497	0.500	0.503	0.507	0.510	0.513	0.517	0.520	0.523	0.527	320
330	0.527	0.530	0.533	0.537	0.540	0.544	0.547	0.550	0.554	0.557	0.561	330
340	0.561	0.564	0.568	0.571	0.575	0.578	0.582	0.585	0.589	0.592	0.596	340
350	0.596	0.599	0.603	0.607	0.610	0.614	0.617	0.621	0.625	0.628	0.632	350
360	0.632	0.636	0.639	0.643	0.647	0.650	0.654	0.658	0.662	0.665	0.669	360
370	0.669	0.673	0.677	0.680	0.684	0.688	0.692	0.696	0.700	0.703	0.707	370
380	0.707	0.711	0.715	0.719	0.723	0.727	0.731	0.735	0.738	0.742	0.746	380
390	0.746	0.750	0.754	0.758	0.762	0.766	0.770	0.774	0.778	0.782	0.787	390
400	0.787	0.791	0.795	0.799	0.803	0.807	0.811	0.815	0.819	0.824	0.828	400

TERMOCUPLA

TIPO

B

Voltaje termoeléctrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
410	0.828	0.832	0.836	0.840	0.844	0.849	0.853	0.857	0.861	0.866	0.870	410
420	0.870	0.874	0.878	0.883	0.887	0.891	0.896	0.900	0.904	0.909	0.913	420
430	0.913	0.917	0.922	0.926	0.930	0.935	0.939	0.944	0.948	0.953	0.957	430
440	0.957	0.961	0.966	0.970	0.975	0.979	0.984	0.988	0.993	0.997	1.002	440
450	1.002	1.007	1.011	1.016	1.020	1.025	1.030	1.034	1.039	1.043	1.048	450
460	1.048	1.053	1.057	1.062	1.067	1.071	1.076	1.081	1.086	1.090	1.095	460
470	1.095	1.100	1.105	1.109	1.114	1.119	1.124	1.129	1.133	1.138	1.143	470
480	1.143	1.148	1.153	1.158	1.163	1.167	1.172	1.177	1.182	1.187	1.192	480
490	1.192	1.197	1.202	1.207	1.212	1.217	1.222	1.227	1.232	1.237	1.242	490
500	1.242	1.247	1.252	1.257	1.262	1.267	1.272	1.277	1.282	1.288	1.293	500
510	1.293	1.298	1.303	1.308	1.313	1.318	1.324	1.329	1.334	1.339	1.344	510
520	1.344	1.350	1.355	1.360	1.365	1.371	1.376	1.381	1.387	1.392	1.397	520
530	1.397	1.402	1.408	1.413	1.418	1.424	1.429	1.435	1.440	1.445	1.451	530
540	1.451	1.456	1.462	1.467	1.472	1.478	1.483	1.489	1.494	1.500	1.505	540
550	1.505	1.511	1.516	1.522	1.527	1.533	1.539	1.544	1.550	1.555	1.561	550
560	1.561	1.566	1.572	1.578	1.583	1.589	1.595	1.600	1.606	1.612	1.617	560
570	1.617	1.623	1.629	1.634	1.640	1.646	1.652	1.657	1.663	1.669	1.675	570
580	1.675	1.680	1.686	1.692	1.698	1.704	1.709	1.715	1.721	1.727	1.733	580
590	1.733	1.739	1.745	1.750	1.756	1.762	1.768	1.774	1.780	1.786	1.792	590
600	1.792	1.798	1.804	1.810	1.816	1.822	1.828	1.834	1.840	1.846	1.852	600

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
610	1.852	1.858	1.864	1.870	1.876	1.882	1.888	1.894	1.901	1.907	1.913	610
620	1.913	1.919	1.925	1.931	1.937	1.944	1.950	1.956	1.962	1.968	1.975	620
630	1.975	1.981	1.987	1.993	1.999	2.006	2.012	2.018	2.025	2.031	2.037	630
640	2.037	2.043	2.050	2.056	2.062	2.069	2.075	2.082	2.088	2.094	2.101	640
650	2.101	2.107	2.113	2.120	2.126	2.133	2.139	2.146	2.152	2.158	2.165	650
660	2.165	2.171	2.178	2.184	2.191	2.197	2.204	2.210	2.217	2.224	2.230	660
670	2.230	2.237	2.243	2.250	2.256	2.263	2.270	2.276	2.283	2.289	2.296	670
680	2.296	2.303	2.309	2.316	2.323	2.329	2.336	2.343	2.350	2.356	2.363	680
690	2.363	2.370	2.376	2.383	2.390	2.397	2.403	2.410	2.417	2.424	2.431	690
700	2.431	2.437	2.444	2.451	2.458	2.465	2.472	2.479	2.485	2.492	2.499	700
710	2.499	2.506	2.513	2.520	2.527	2.534	2.541	2.548	2.555	2.562	2.569	710
720	2.569	2.576	2.583	2.590	2.597	2.604	2.611	2.618	2.625	2.632	2.639	720
730	2.639	2.646	2.653	2.660	2.667	2.674	2.681	2.688	2.696	2.703	2.710	730
740	2.710	2.717	2.724	2.731	2.738	2.746	2.753	2.760	2.767	2.775	2.782	740
750	2.782	2.789	2.796	2.803	2.811	2.818	2.825	2.833	2.840	2.847	2.854	750
760	2.854	2.862	2.869	2.876	2.884	2.891	2.898	2.906	2.913	2.921	2.928	760
770	2.928	2.935	2.943	2.950	2.958	2.965	2.973	2.980	2.987	2.995	3.002	770
780	3.002	3.010	3.017	3.025	3.032	3.040	3.047	3.055	3.062	3.070	3.078	780
790	3.078	3.085	3.093	3.100	3.108	3.116	3.123	3.131	3.138	3.146	3.154	790
800	3.154	3.161	3.169	3.177	3.184	3.192	3.200	3.207	3.215	3.223	3.230	800

TERMOCUPLA

TIPO

B

Voltaje termoeléctrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
810	3.230	3.238	3.246	3.254	3.261	3.269	3.277	3.285	3.292	3.300	3.308	810
820	3.308	3.316	3.324	3.331	3.339	3.347	3.355	3.363	3.371	3.379	3.386	820
830	3.386	3.394	3.402	3.410	3.418	3.426	3.434	3.442	3.450	3.458	3.466	830
840	3.466	3.474	3.482	3.490	3.498	3.506	3.514	3.522	3.530	3.538	3.546	840
850	3.546	3.554	3.562	3.570	3.578	3.586	3.594	3.602	3.610	3.618	3.626	850
860	3.626	3.634	3.643	3.651	3.659	3.667	3.675	3.683	3.692	3.700	3.708	860
870	3.708	3.716	3.724	3.732	3.741	3.749	3.757	3.765	3.774	3.782	3.790	870
880	3.790	3.798	3.807	3.815	3.823	3.832	3.840	3.848	3.857	3.865	3.873	880
890	3.873	3.882	3.890	3.898	3.907	3.915	3.923	3.932	3.940	3.949	3.957	890
900	3.957	3.965	3.974	3.982	3.991	3.999	4.008	4.016	4.024	4.033	4.041	900
910	4.041	4.050	4.058	4.067	4.075	4.084	4.093	4.101	4.110	4.118	4.127	910
920	4.127	4.135	4.144	4.152	4.161	4.170	4.178	4.187	4.195	4.204	4.213	920
930	4.213	4.221	4.230	4.239	4.247	4.256	4.265	4.273	4.282	4.291	4.299	930
940	4.299	4.308	4.317	4.326	4.334	4.343	4.352	4.360	4.369	4.378	4.387	940
950	4.387	4.396	4.404	4.413	4.422	4.431	4.440	4.448	4.457	4.466	4.475	950
960	4.475	4.484	4.493	4.501	4.510	4.519	4.528	4.537	4.546	4.555	4.564	960
970	4.564	4.573	4.582	4.591	4.599	4.608	4.617	4.626	4.635	4.644	4.653	970
980	4.653	4.662	4.671	4.680	4.689	4.698	4.707	4.716	4.725	4.734	4.743	980
990	4.743	4.753	4.762	4.771	4.780	4.789	4.798	4.807	4.816	4.825	4.834	990
1000	4.834	4.843	4.853	4.862	4.871	4.880	4.889	4.898	4.908	4.917	4.926	1000

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
1010	4.926	4.935	4.944	4.954	4.963	4.972	4.981	4.990	5.000	5.009	5.018	1010
1020	5.018	5.027	5.037	5.046	5.055	5.065	5.074	5.083	5.092	5.102	5.111	1020
1030	5.111	5.120	5.130	5.139	5.148	5.158	5.167	5.176	5.186	5.195	5.205	1030
1040	5.205	5.214	5.223	5.233	5.242	5.252	5.261	5.270	5.280	5.289	5.299	1040
1050	5.299	5.308	5.318	5.327	5.337	5.346	5.356	5.365	5.375	5.384	5.394	1050
1060	5.394	5.403	5.413	5.422	5.432	5.441	5.451	5.460	5.470	5.480	5.489	1060
1070	5.489	5.499	5.508	5.518	5.528	5.537	5.547	5.556	5.566	5.576	5.585	1070
1080	5.585	5.595	5.605	5.614	5.624	5.634	5.643	5.653	5.663	5.672	5.682	1080
1090	5.682	5.692	5.702	5.711	5.721	5.731	5.740	5.750	5.760	5.770	5.780	1090
1100	5.780	5.789	5.799	5.809	5.819	5.828	5.838	5.848	5.858	5.868	5.878	1100
1110	5.878	5.887	5.897	5.907	5.917	5.927	5.937	5.947	5.956	5.966	5.976	1110
1120	5.976	5.986	5.996	6.006	6.016	6.026	6.036	6.046	6.055	6.065	6.075	1120
1130	6.075	6.085	6.095	6.105	6.115	6.125	6.135	6.145	6.155	6.165	6.175	1130
1140	6.175	6.185	6.195	6.205	6.215	6.225	6.235	6.245	6.256	6.266	6.276	1140
1150	6.276	6.286	6.296	6.306	6.316	6.326	6.336	6.346	6.356	6.367	6.377	1150
1160	6.377	6.387	6.397	6.407	6.417	6.427	6.438	6.448	6.458	6.468	6.478	1160
1170	6.478	6.488	6.499	6.509	6.519	6.529	6.539	6.550	6.560	6.570	6.580	1170
1180	6.580	6.591	6.601	6.611	6.621	6.632	6.642	6.652	6.663	6.673	6.683	1180
1190	6.683	6.693	6.704	6.714	6.724	6.735	6.745	6.755	6.766	6.776	6.786	1190
1200	6.786	6.797	6.807	6.818	6.828	6.838	6.849	6.859	6.869	6.880	6.890	1200

TERMOCUPLA

TIPO

B

Voltaje termoeléctrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
1210	6.890	6.901	6.911	6.922	6.932	6.942	6.953	6.963	6.974	6.984	6.995	1210
1220	6.995	7.005	7.016	7.026	7.037	7.047	7.058	7.068	7.079	7.089	7.100	1220
1230	7.100	7.110	7.121	7.131	7.142	7.152	7.163	7.173	7.184	7.194	7.205	1230
1240	7.205	7.216	7.226	7.237	7.247	7.258	7.269	7.279	7.290	7.300	7.311	1240
1250	7.311	7.322	7.332	7.343	7.353	7.364	7.375	7.385	7.396	7.407	7.417	1250
1260	7.417	7.428	7.439	7.449	7.460	7.471	7.482	7.492	7.503	7.514	7.524	1260
1270	7.524	7.535	7.546	7.557	7.567	7.578	7.589	7.600	7.610	7.621	7.632	1270
1280	7.632	7.643	7.653	7.664	7.675	7.686	7.697	7.707	7.718	7.729	7.740	1280
1290	7.740	7.751	7.761	7.772	7.783	7.794	7.805	7.816	7.827	7.837	7.848	1290
1300	7.848	7.859	7.870	7.881	7.892	7.903	7.914	7.924	7.935	7.946	7.957	1300
1310	7.957	7.968	7.979	7.990	8.001	8.012	8.023	8.034	8.045	8.056	8.066	1310
1320	8.066	8.077	8.088	8.099	8.110	8.121	8.132	8.143	8.154	8.165	8.176	1320
1330	8.176	8.187	8.198	8.209	8.220	8.231	8.242	8.253	8.264	8.275	8.286	1330
1340	8.286	8.298	8.309	8.320	8.331	8.342	8.353	8.364	8.375	8.386	8.397	1340
1350	8.397	8.408	8.419	8.430	8.441	8.453	8.464	8.475	8.486	8.497	8.508	1350
1360	8.508	8.519	8.530	8.542	8.553	8.564	8.575	8.586	8.597	8.608	8.620	1360
1370	8.620	8.631	8.642	8.653	8.664	8.675	8.687	8.698	8.709	8.720	8.731	1370
1380	8.731	8.743	8.754	8.765	8.776	8.787	8.799	8.810	8.821	8.832	8.844	1380
1390	8.844	8.855	8.866	8.877	8.889	8.900	8.911	8.922	8.934	8.945	8.956	1390
1400	8.956	8.967	8.979	8.990	9.001	9.013	9.024	9.035	9.047	9.058	9.069	1400

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
1410	9.069	9.080	9.092	9.103	9.114	9.126	9.137	9.148	9.160	9.171	9.182	1410
1420	9.182	9.194	9.205	9.216	9.228	9.239	9.251	9.262	9.273	9.285	9.296	1420
1430	9.296	9.307	9.319	9.330	9.342	9.353	9.364	9.376	9.387	9.398	9.410	1430
1440	9.410	9.421	9.433	9.444	9.456	9.467	9.478	9.490	9.501	9.513	9.524	1440
1450	9.524	9.536	9.547	9.558	9.570	9.581	9.593	9.604	9.616	9.627	9.639	1450
1460	9.639	9.650	9.662	9.673	9.684	9.696	9.707	9.719	9.730	9.742	9.753	1460
1470	9.753	9.765	9.776	9.788	9.799	9.811	9.822	9.834	9.845	9.857	9.868	1470
1480	9.868	9.880	9.891	9.903	9.914	9.926	9.937	9.949	9.961	9.972	9.984	1480
1490	9.984	9.995	10.007	10.018	10.030	10.041	10.053	10.064	10.076	10.088	10.099	1490
1500	10.099	10.111	10.122	10.134	10.145	10.157	10.168	10.180	10.192	10.203	10.215	1500
1510	10.215	10.226	10.238	10.249	10.261	10.273	10.284	10.296	10.307	10.319	10.331	1510
1520	10.331	10.342	10.354	10.365	10.377	10.389	10.400	10.412	10.423	10.435	10.447	1520
1530	10.447	10.458	10.470	10.482	10.493	10.505	10.516	10.528	10.540	10.551	10.563	1530
1540	10.563	10.575	10.586	10.598	10.609	10.621	10.633	10.644	10.656	10.668	10.679	1540
1550	10.679	10.691	10.703	10.714	10.726	10.738	10.749	10.761	10.773	10.784	10.796	1550
1560	10.796	10.808	10.819	10.831	10.843	10.854	10.866	10.877	10.889	10.901	10.913	1560
1570	10.913	10.924	10.936	10.948	10.959	10.971	10.983	10.994	11.006	11.018	11.029	1570
1580	11.029	11.041	11.053	11.064	11.076	11.088	11.099	11.111	11.123	11.134	11.146	1580
1590	11.146	11.158	11.169	11.181	11.193	11.205	11.216	11.228	11.240	11.251	11.263	1590
1600	11.263	11.275	11.286	11.298	11.310	11.321	11.333	11.345	11.357	11.368	11.380	1600

TERMOCUPLA**TIPO****B**

Voltaje termoelectrico en milivoltios (mV)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
1610	11.380	11.392	11.403	11.415	11.427	11.438	11.450	11.462	11.474	11.485	11.497	1610
1620	11.497	11.509	11.520	11.532	11.544	11.555	11.567	11.579	11.591	11.602	11.614	1620
1630	11.614	11.626	11.637	11.649	11.661	11.673	11.684	11.696	11.708	11.719	11.731	1630
1640	11.731	11.743	11.754	11.766	11.778	11.790	11.801	11.813	11.825	11.836	11.848	1640
1650	11.848	11.860	11.871	11.883	11.895	11.907	11.918	11.930	11.942	11.953	11.965	1650
1660	11.965	11.977	11.988	12.000	12.012	12.024	12.035	12.047	12.059	12.070	12.082	1660
1670	12.082	12.094	12.105	12.117	12.129	12.141	12.152	12.164	12.176	12.187	12.199	1670
1680	12.199	12.211	12.222	12.234	12.246	12.257	12.269	12.281	12.292	12.304	12.316	1680
1690	12.316	12.327	12.339	12.351	12.363	12.374	12.386	12.398	12.409	12.421	12.433	1690
1700	12.433	12.444	12.456	12.468	12.479	12.491	12.503	12.514	12.526	12.538	12.549	1700
1710	12.549	12.561	12.572	12.584	12.596	12.607	12.619	12.631	12.642	12.654	12.666	1710
1720	12.666	12.677	12.689	12.701	12.712	12.724	12.736	12.747	12.759	12.770	12.782	1720
1730	12.782	12.794	12.805	12.817	12.829	12.840	12.852	12.863	12.875	12.887	12.898	1730
1740	12.898	12.910	12.921	12.933	12.945	12.956	12.968	12.980	12.991	13.003	13.014	1740
1750	13.014	13.026	13.037	13.049	13.061	13.072	13.084	13.095	13.107	13.119	13.130	1750
1760	13.130	13.142	13.153	13.165	13.176	13.188	13.200	13.211	13.223	13.234	13.246	1760
1770	13.246	13.257	13.269	13.280	13.292	13.304	13.315	13.327	13.338	13.350	13.361	1770
1780	13.361	13.373	13.384	13.396	13.407	13.419	13.430	13.442	13.453	13.465	13.476	1780
1790	13.476	13.488	13.499	13.511	13.522	13.534	13.545	13.557	13.568	13.580	13.591	1790
1800	13.591	13.603	13.614	13.626	13.637	13.649	13.660	13.672	13.683	13.694	13.706	1800
1810	13.706	13.717	13.729	13.740	13.752	13.763	13.775	13.786	13.797	13.809	13.820	1810

PT 100

Curva Europea 0.00385

Salida en Ohmios

°C	Ohmios	°C	Ohmios	°C	Ohmios	°C	Ohmios	°C	Ohmios	°C	Ohmios
-200	18.52	-140	43.88	-80	68.33	-20	92.16	0	100.00	60	123.24
-199	18.96	-139	44.29	-79	68.73	-19	92.55	1	100.39	61	123.62
-198	19.39	-138	44.71	-78	69.13	-18	92.95	2	100.78	62	124.01
-197	19.82	-137	45.12	-77	69.53	-17	93.34	3	101.17	63	124.39
-196	20.25	-136	45.53	-76	69.93	-16	93.73	4	101.56	64	124.77
-195	20.68	-135	45.95	-75	70.33	-15	94.12	5	101.95	65	125.15
-194	21.11	-134	46.35	-74	70.73	-14	94.52	6	102.34	66	125.55
-193	21.54	-133	46.76	-73	71.13	-13	94.91	7	102.73	67	125.93
-192	21.97	-132	47.18	-72	71.53	-12	95.30	8	103.12	68	126.32
-191	22.40	-131	47.59	-71	71.93	-11	95.69	9	103.51	69	126.70
-190	22.83	-130	48.00	-70	72.33	-10	96.09	10	103.90	70	127.08
-189	23.26	-129	48.41	-69	72.73	-9	96.48	11	104.29	71	127.46
-188	23.69	-128	48.82	-68	73.13	-8	96.87	12	104.68	72	127.85
-187	24.12	-127	49.23	-67	73.53	-7	97.26	13	105.07	73	128.23
-186	24.55	-126	49.64	-66	73.93	-6	97.65	14	105.46	74	128.61
-185	24.97	-125	50.06	-65	74.33	-5	98.04	15	105.85	75	128.99
-184	25.39	-124	50.47	-64	74.73	-4	98.44	16	106.24	76	129.38
-183	25.82	-123	50.88	-63	75.13	-3	98.83	17	106.63	77	129.76
-182	26.25	-122	51.29	-62	75.53	-2	99.22	18	107.02	78	130.14
-181	26.67	-121	51.70	-61	75.93	-1	99.61	19	107.40	79	130.52
-180	27.10	-120	52.11	-60	76.33			20	107.79	80	130.90
-179	27.52	-119	52.52	-59	76.73			21	108.18	81	131.28
-178	27.95	-118	52.92	-58	77.13			22	108.57	82	131.67
-177	28.37	-117	53.33	-57	77.52			23	108.96	83	132.05
-176	28.80	-116	53.74	-56	77.92			24	109.35	84	132.43
-175	29.22	-115	54.15	-55	78.32			25	109.73	85	132.81
-174	29.65	-114	54.56	-54	78.72			26	110.12	86	133.19
-173	30.07	-113	54.97	-53	79.11			27	110.51	87	133.57
-172	30.49	-112	55.38	-52	79.51			28	110.90	88	133.95
-171	30.92	-111	55.78	-51	79.91			29	111.28	89	134.33
-170	31.34	-110	56.19	-50	80.31			30	111.67	90	134.71
-169	31.76	-109	56.60	-49	80.70			31	112.06	91	135.09
-168	32.18	-108	57.00	-48	81.10			32	112.45	92	135.47
-167	32.61	-107	57.41	-47	81.50			33	112.83	93	135.85
-166	33.03	-106	57.82	-46	81.89			34	113.22	94	136.23
-165	33.45	-105	58.22	-45	82.29			35	113.61	95	136.61
-164	33.86	-104	58.63	-44	82.69			36	113.99	96	136.99
-163	34.28	-103	59.04	-43	83.08			37	114.38	97	137.37
-162	34.70	-102	59.44	-42	83.48			38	114.77	98	137.75
-161	35.12	-101	59.85	-41	83.88			39	115.15	99	138.13
-160	35.54	-100	60.26	-40	84.27			40	115.54	100	138.51
-159	35.96	-99	60.67	-39	84.67			41	115.93	101	138.89
-158	36.38	-98	61.07	-38	85.06			42	116.31	102	139.27
-157	36.80	-97	61.48	-37	85.46			43	116.70	103	139.65
-156	37.22	-96	61.87	-36	85.85			44	117.08	104	140.03
-155	37.63	-95	62.29	-35	86.25			45	117.47	105	140.39
-154	38.05	-94	62.69	-34	86.64			46	117.85	106	140.77
-153	38.47	-93	63.10	-33	87.04			47	118.24	107	141.15
-152	38.89	-92	63.50	-32	87.43			48	118.62	108	141.53
-151	39.31	-91	63.91	-31	87.83			49	119.01	109	141.91
-150	39.72	-90	64.30	-30	88.22			50	119.40	110	142.29
-149	40.14	-89	64.70	-29	88.62			51	119.78	111	142.66
-148	40.56	-88	65.11	-28	89.01			52	120.16	112	143.04
-147	40.97	-87	65.51	-27	89.40			53	120.55	113	143.42
-146	41.39	-86	65.91	-26	89.80			54	120.93	114	143.80
-145	41.80	-85	66.31	-25	90.19			55	121.32	115	144.18
-144	42.22	-84	66.72	-24	90.59			56	121.70	116	144.56
-143	42.64	-83	67.12	-23	90.98			57	122.09	117	144.94
-142	43.05	-82	67.52	-22	91.37			58	122.47	118	145.32
-141	43.46	-81	67.92	-21	91.77			59	122.86	119	145.69

PT 100

Curva Europea 0.00385

Salida en Ohmios

°C	Ohmios	°C	Ohmios	°C	Ohmios	°C	Ohmios	°C	Ohmios	°C	Ohmios
120	146.07	180	168.48	240	190.47	300	212.05	360	233.21	420	253.96
121	146.45	181	168.85	241	190.83	301	212.40	361	233.56	421	254.30
122	146.82	182	169.22	242	191.20	302	212.76	362	233.91	422	254.65
123	147.20	183	169.59	243	191.56	303	213.12	363	234.26	423	254.99
124	147.58	184	169.96	244	191.92	304	213.47	364	234.60	424	255.33
125	147.95	185	170.33	245	192.28	305	213.83	365	234.95	425	255.67
126	148.33	186	170.69	246	192.66	306	214.19	366	235.30	426	256.01
127	148.71	187	171.06	247	193.02	307	214.55	367	235.65	427	256.35
128	149.08	188	171.43	248	193.38	308	214.90	368	236.00	428	256.70
129	149.46	189	171.80	249	193.74	309	215.26	369	236.35	429	257.04
130	149.83	190	172.17	250	194.10	310	215.61	370	236.70	430	257.38
131	150.21	191	172.54	251	194.47	311	215.97	371	237.05	431	257.72
132	150.58	192	172.91	252	194.83	312	216.32	372	237.40	432	258.06
133	150.96	193	173.27	253	195.19	313	216.68	373	237.75	433	258.40
134	151.34	194	173.64	254	195.55	314	217.03	374	238.09	434	258.74
135	151.71	195	174.01	255	195.90	315	217.39	375	238.44	435	259.08
136	152.09	196	174.39	256	196.26	316	217.73	376	238.79	436	259.42
137	152.46	197	174.75	257	196.62	317	218.08	377	239.14	437	259.76
138	152.84	198	175.12	258	196.98	318	218.44	378	239.48	438	260.10
139	153.21	199	175.49	259	197.35	319	218.79	379	239.83	439	260.44
140	153.58	200	175.86	260	197.71	320	219.15	380	240.18	440	260.78
141	153.95	201	176.23	261	198.07	321	219.50	381	240.52	441	261.12
142	154.32	202	176.59	262	198.43	322	219.85	382	240.87	442	261.46
143	154.71	203	176.96	263	198.79	323	220.21	383	241.22	443	261.80
144	155.08	204	177.33	264	199.15	324	220.56	384	241.56	444	262.14
145	155.46	205	177.70	265	199.51	325	220.91	385	241.91	445	262.48
146	155.83	206	178.06	266	199.87	326	221.27	386	242.25	446	262.83
147	156.21	207	178.43	267	200.23	327	221.62	387	242.60	447	263.17
148	156.58	208	178.80	268	200.59	328	221.97	388	242.95	448	263.51
149	156.96	209	179.16	269	200.95	329	222.32	389	243.29	449	263.85
150	157.33	210	179.53	270	201.31	330	222.67	390	243.64	450	264.19
151	157.71	211	179.90	271	201.67	331	223.03	391	243.98	451	264.53
152	158.08	212	180.26	272	202.03	332	223.38	392	244.33	452	264.87
153	158.45	213	180.63	273	202.38	333	223.73	393	244.67	453	265.21
154	158.83	214	180.99	274	202.74	334	224.09	394	245.02	454	265.55
155	159.20	215	181.36	275	203.10	335	224.44	395	245.36	455	265.89
156	159.58	216	181.73	276	203.46	336	224.80	396	245.71	456	266.23
157	159.95	217	182.09	277	203.82	337	225.15	397	246.05	457	266.57
158	160.33	218	182.46	278	204.18	338	225.50	398	246.40	458	266.91
159	160.70	219	182.82	279	204.54	339	225.85	399	246.74	459	267.25
160	161.08	220	183.19	280	204.90	340	226.21	400	247.09	460	267.59
161	161.45	221	183.55	281	205.25	341	226.56	401	247.43	461	267.93
162	161.83	222	183.92	282	205.61	342	226.91	402	247.78	462	268.27
163	162.20	223	184.28	283	205.97	343	227.26	403	248.12	463	268.61
164	162.58	224	184.65	284	206.33	344	227.61	404	248.46	464	268.95
165	162.95	225	185.01	285	206.70	345	227.96	405	248.81	465	269.29
166	163.33	226	185.38	286	207.05	346	228.31	406	249.15	466	269.63
167	163.70	227	185.74	287	207.41	347	228.66	407	249.50	467	269.97
168	164.08	228	186.11	288	207.77	348	229.01	408	249.84	468	270.31
169	164.45	229	186.47	289	208.13	349	229.36	409	250.18	469	270.65
170	164.83	230	186.84	290	208.48	350	229.71	410	250.53	470	270.99
171	165.20	231	187.20	291	208.84	351	230.07	411	250.87	471	271.33
172	165.58	232	187.56	292	209.20	352	230.42	412	251.21	472	271.67
173	165.95	233	187.93	293	209.55	353	230.77	413	251.56	473	272.01
174	166.33	234	188.29	294	209.91	354	231.12	414	251.90	474	272.35
175	166.70	235	188.65	295	210.27	355	231.47	415	252.24	475	272.69
176	167.08	236	189.02	296	210.62	356	231.81	416	252.59	476	273.03
177	167.45	237	189.38	297	210.98	357	232.16	417	252.93	477	273.37
178	167.83	238	189.74	298	211.34	358	232.51	418	253.28	478	273.71
179	168.20	239	190.11	299	211.69	359	232.86	419	253.62	479	274.05
180	168.58	240	190.47	300	212.05	360	233.21	420	253.96	480	274.39
181	168.95	241	190.83	301	212.40	361	233.56	421	254.30	481	274.73
182	169.33	242	191.20	302	212.76	362	233.91	422	254.65	482	275.07
183	169.70	243	191.56	303	213.12	363	234.26	423	254.99	483	275.41
184	170.08	244	191.92	304	213.47	364	234.60	424	255.33	484	275.75
185	170.45	245	192.28	305	213.83	365	234.95	425	255.67	485	276.09
186	170.83	246	192.66	306	214.19	366	235.30	426	256.01	486	276.43
187	171.20	247	193.02	307	214.55	367	235.65	427	256.35	487	276.77
188	171.58	248	193.38	308	214.90	368	236.00	428	256.70	488	277.11
189	171.95	249	193.74	309	215.26	369	236.35	429	257.04	489	277.45
190	172.33	250	194.10	310	215.61	370	236.70	430	257.38	490	277.79
191	172.70	251	194.47	311	215.97	371	237.05	431	257.72	491	278.13
192	173.08	252	194.83	312	216.32	372	237.40	432	258.06	492	278.47
193	173.45	253	195.19	313	216.68	373	237.75	433	258.40	493	278.81
194	173.83	254	195.55	314	217.03	374	238.09	434	258.74	494	279.15
195	174.20	255	195.90	315	217.39	375	238.44	435	259.08	495	279.49
196	174.58	256	196.26	316	217.73	376	238.79	436	259.42	496	279.83
197	174.95	257	196.62	317	218.08	377	239.14	437	259.76	497	280.17
198	175.33	258	196.98	318	218.44	378	239.48	438	260.10	498	280.51
199	175.70	259	197.35	319	218.79	379	239.83	439	260.44	499	280.85
200	176.08	260	197.71	320	219.15	380	240.18	440	260.78	500	281.19
201	176.45	261	198.07	321	219.50	381	240.52	441	261.12	501	281.53
202	176.83	262	198.43	322	219.85	382	240.87	442	261.46	502	281.87
203	177.20	263	198.79	323	220.21	383	241.22	443	261.80	503	282.21
204	177.58	264	199.15	324	220.56	384	241.56	444	262.14	504	282.55
205	177.95	265	199.51	325	220.91	385	241.91	445	262.48	505	282.89
206	178.33	266	199.87	326	221.27	386	242.25	446	262.83	506	283.23
207	178.70	267	200.23	327	221.62	387	242.60	447	263.17	507	283.57
208	179.08	268	200.59	328	221.97	388	242.95	448	263.51	508	283.91
209	179.45	269	200.95	329	222.32	389	243.29	449	263.85	509	284.25
210	179.83	270	201.31	330	222.67	390	243.64	450	264.19	510	284.59
211	180.20	271	201.67	331	223.03	391	243.98	451	264.53	511	284.93
212	180.58	272	202.03	332	223.38	392	244.33	452	264.87	512	285.27

PT 100

Curva Europea 0.00385

Salida en Ohmios

°C	Ohmios	°C	Ohmios	°C	Ohmios	°C	Ohmios	°C	Ohmios	°C	Ohmios
480	274.29	542	294.87	604	315.00	666	334.68	728	353.91	790	372.71
481	274.62	543	295.20	605	315.32	667	334.99	729	354.22	791	373.01
482	274.96	544	295.53	606	315.64	668	335.31	730	354.53	792	373.31
483	275.29	545	295.85	607	315.96	669	335.62	731	354.83	793	373.61
484	275.63	546	296.18	608	316.28	670	335.93	732	355.14	794	373.91
485	275.96	547	296.51	609	316.60	671	336.25	733	355.44	795	374.21
486	276.31	548	296.84	610	316.92	672	336.56	734	355.75	796	374.51
487	276.64	549	297.16	611	317.24	673	336.87	735	356.06	797	374.80
488	276.97	550	297.49	612	317.56	674	337.18	736	356.37	798	374.10
489	277.31	551	297.82	613	317.88	675	337.50	737	356.68	799	375.40
490	277.64	552	298.14	614	318.20	676	337.81	738	356.98	800	375.70
491	277.98	553	298.47	615	318.52	677	338.12	739	357.29	801	376.00
492	278.31	554	298.80	616	318.85	678	338.43	740	357.59	802	376.29
493	278.64	555	299.12	617	319.17	679	338.75	741	357.90	803	376.59
494	278.98	556	299.45	618	319.49	680	339.06	742	358.20	804	376.89
495	279.31	557	299.78	619	319.81	681	339.37	743	358.51	805	377.19
496	279.64	558	300.10	620	320.12	682	339.68	744	358.81	806	377.49
497	279.98	559	300.43	621	320.44	683	339.99	745	359.12	807	377.79
498	280.31	560	300.75	622	320.76	684	340.30	746	359.42	808	378.09
499	280.64	561	301.08	623	321.08	685	340.62	747	359.72	809	378.39
500	280.98	562	301.41	624	321.40	686	340.94	748	360.03	810	378.68
501	281.31	563	301.73	625	321.72	687	341.25	749	360.33	811	378.98
502	281.64	564	302.06	626	322.03	688	341.55	750	360.64	812	379.28
503	281.97	565	302.38	627	322.34	689	341.87	751	360.94	813	379.57
504	282.31	566	302.71	628	322.66	690	342.18	752	361.24	814	379.87
505	282.64	567	303.03	629	322.98	691	342.49	753	361.55	815	380.17
506	282.97	568	303.36	630	323.30	692	342.80	754	361.85	816	380.46
507	283.30	569	303.68	631	323.61	693	343.11	755	362.15	817	380.76
508	283.63	570	304.01	632	323.93	694	343.42	756	362.46	818	381.05
509	283.97	571	304.33	633	324.25	695	343.73	757	362.76	819	381.35
510	284.30	572	304.66	634	324.57	696	344.04	758	363.06	820	381.65
511	284.63	573	304.98	635	324.88	697	344.35	759	363.36	821	381.94
512	284.96	574	305.30	636	325.21	698	344.66	760	363.67	822	382.24
513	285.29	575	305.63	637	325.53	699	344.97	761	363.97	823	382.53
514	285.62	576	305.95	638	325.85	700	345.28	762	364.27	824	382.83
515	285.95	577	306.28	639	326.16	701	345.59	763	364.57	825	383.12
516	286.30	578	306.60	640	326.48	702	345.90	764	364.88	826	383.42
517	286.63	579	306.92	641	326.79	703	346.21	765	365.18	827	383.71
518	286.96	580	307.25	642	327.11	704	346.52	766	365.49	828	384.01
519	287.29	581	307.57	643	327.43	705	346.83	767	365.79	829	384.30
520	287.62	582	307.89	644	327.74	706	347.15	768	366.09	830	384.60
521	287.95	583	308.22	645	328.06	707	347.46	769	366.40	831	384.89
522	288.28	584	308.54	646	328.38	708	347.77	770	366.70	832	385.18
523	288.61	585	308.86	647	328.69	709	348.07	771	367.00	833	385.48
524	288.94	586	309.19	648	329.01	710	348.38	772	367.30	834	385.77
525	289.27	587	309.51	649	329.32	711	348.69	773	367.60	835	386.07
526	289.60	588	309.83	650	329.64	712	349.00	774	367.90	836	386.37
527	289.93	589	310.15	651	329.95	713	349.31	775	368.20	837	386.66
528	290.26	590	310.48	652	330.27	714	349.61	776	368.50	838	386.96
529	290.59	591	310.80	653	330.58	715	349.92	777	368.81	839	387.25
530	290.92	592	311.12	654	330.90	716	350.23	778	369.11	840	387.55
531	291.25	593	311.45	655	331.21	717	350.54	779	369.41	841	387.84
532	291.58	594	311.78	656	331.53	718	350.85	780	369.71	842	388.13
533	291.90	595	312.10	657	331.84	719	351.15	781	370.01	843	388.42
534	292.23	596	312.43	658	332.16	720	351.46	782	370.31	844	388.72
535	292.56	597	312.75	659	332.47	721	351.77	783	370.61	845	389.01
536	292.90	598	313.07	660	332.79	722	352.07	784	370.91	846	389.31
537	293.23	599	313.39	661	333.10	723	352.38	785	371.21	847	389.61
538	293.56	600	313.71	662	333.41	724	352.69	786	371.52	848	389.90
539	293.89	601	314.04	663	333.73	725	352.99	787	371.82	849	390.19
540	294.21	602	314.36	664	334.04	726	353.30	788	372.12	850	390.48

BIBLIOGRAFÍA

Considine, Douglas M. (1993). *Process Industrial Instruments and control Handbook*. 4 edition. McGraw-Hill Inc.

Crabtree, Mick (2004). *Industrial temperature measurement*. 1 edition. Crabtree control Ltd.

D. A., Coggan; C. L., Albert (1996). *Fundamentals of industrial controls*. 2 edition. Instrument Society of America.

Omega Technologies (1999). *Non contact temperature measurement*. 2 edition. Putman Publishing Company and Omega Press LLC.

Capítulo 5

MEDICIÓN DE PRESIÓN



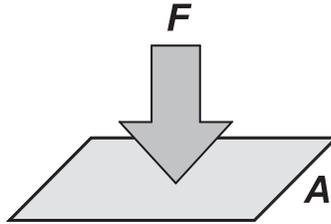
Santuario histórico de Machu Pichu, Perú

5.1. FUNDAMENTOS DE PRESIÓN

5.1.1. Definición de presión

Es definida como la fuerza distribuida uniformemente en un área determinada y actuando sobre ella.

Figura 5-1. Definición de presión



Se expresa por medio de la siguiente fórmula:

$$P = \frac{F}{A}$$

Donde:

P : Presión

F : Fuerza

A : Área

Ecuación 5-1. Cálculo de presión.

Todas las presiones se originan por uno o más de los siguientes fenómenos: compresión, gravedad, fuerza centrífuga, cambio de dirección de movimiento, cambio químico o cambio físico.

5.1.2. Vacío

El peso de la atmósfera de la tierra produce una presión igual, a la producida por una columna de mercurio de aproximadamente 30 pulgadas de altura (760 mm Hg). Si la atmósfera no produjera presión, toda presión podría ser medida en la escala absoluta. La porción de la escala absoluta que es menor a 30 pulgadas de columna de mercurio es conocida como vacío, porque esta presión es menor que la ejercida por el peso de la atmósfera.

5.1.3. Presión absoluta

Representa la diferencia entre el punto de medición y el vacío perfecto, donde la presión es cero (ausencia total de presión). Puede ser determinada sumando la presión manométrica a la presión atmosférica.

5.1.4. Presión manométrica

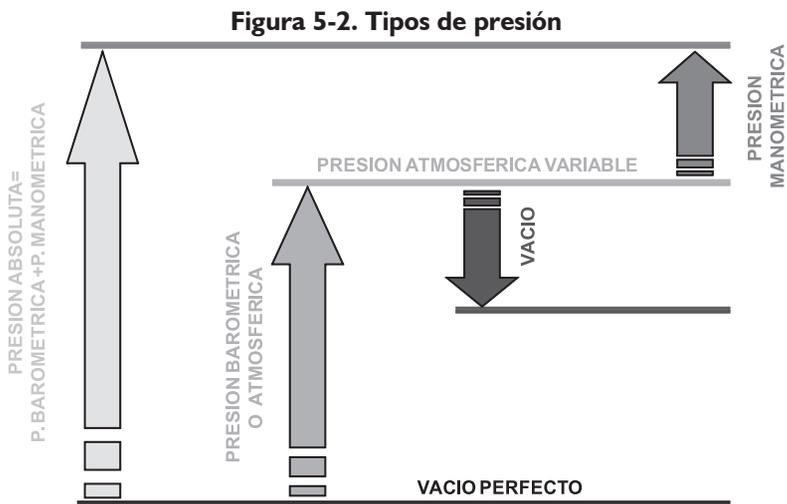
Es la diferencia entre el punto de medición y la presión atmosférica, que sirve como referencia. La presión atmosférica puede ser variable, dependiendo del clima y la altitud sobre el nivel del mar.

5.1.5. Presión barométrica

Es el peso de la atmósfera en unidad de superficie. La lectura barométrica estándar al nivel del mar y a 59°F es 29.92 pulgadas en columna de mercurio o 760 mm Hg.

5.1.6. Presión atmosférica

Es la causada por el peso de la atmósfera que envuelve la capa de la tierra desde una altitud de 500 Km. A esta altitud la presión atmosférica es igual a una presión absoluta de cero. La presión atmosférica depende de la altitud y se toma como referencia la presión al nivel del mar, equivalente a 760 mm Hg, 1013,25 mBar a o 14.7 psia.



5.1.7. Presión estática

En aplicaciones hidráulicas puede ser definida como la presión producida por fluidos estacionarios, siendo esta presión normalmente usada como nivel de referencia. Un buen ejemplo de la presión estática, es la producida por el peso de una columna de agua.

5.1.8. Presión diferencial

En términos simples, es la diferencia de presión entre dos puntos, uno de los cuales es tomado como referencia. Cuando se expresa la presión diferencial, normalmente se usa el sufijo d, por ejemplo psid.

5.1.9. Presión de impacto

Es la presión ejercida por un fluido, paralela a la dirección de flujo debido a la velocidad.

5.1.10. Pulsación

Es un fenómeno transitorio con amplitud y velocidad variable, normalmente difícil de evaluar. La velocidad de propagación es determinada por la presión del fluido, la resistencia de la tubería, válvulas y otros dispositivos por los cuales pasa el fluido.

5.2. UNIDADES Y CONVERSIÓN

En el sistema internacional SI, la unidad de presión es el Pascal que es definida como la fuerza ejercida por 1 Newton en una área de 1m². El Pascal es una unidad muy pequeña, por lo tanto en la práctica se usan múltiplos como el KPa y el MPa.

Para reportes del estado del tiempo, el hPa es usado en muchos países para reemplazar el mBar (1mBar = 1hPa).

En Estados Unidos la presión normalmente se expresa en libras por fuerza cuadrada o psi (Pounds per Square Inch).

Para distinguir cuándo se está midiendo presión absoluta, manométrica o diferencial, se usan sufijos junto a la unidad de medición; por ejemplo, para presión absoluta psia, presión manométrica psig o presión diferencial psid.

Existen otras unidades como el milímetro de mercurio (mmHg) también conocida como Torr o pulgadas de columna de agua a 4°C (inH₂O).

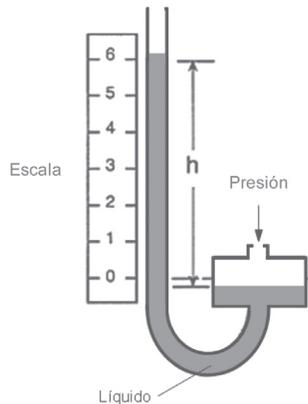
Tabla 5-1. Conversión unidades de presión

De ^a	Pa	Kg/cm ²	Bar	mBar	inH ₂ O (20°C)	inHg (0°C)	psi
Pa	1	0.000102	0.00001	0.01	0.004021	0.000295	0.000145
Kg/cm ²	98066.5	1	0.98066	980.66	394.41	28.959	14.223
Bar	100000	1.01972	1	1000	402.190	29.53	14.5038
mBar	100	0.001019	0.001	1	0.4021	0.02953	0.014503
inH ₂ O (20°C)	248.6	0.00253	0.002486	2.486	1	0.07342	0.036062
inHg (0°C)	3386.4	0.003453	0.03386	33.86	13.6197	1	0.49115
psi	6894.75	0.07030	0.068948	68.948	27.73	2.03602	1

5.3. MANÓMETROS DE LÍQUIDO

Los manómetros de líquido son instrumentos simples y precisos para medición de presión. Su funcionamiento se basa en el principio que el cambio de presión causa incremento o decremento de la columna de líquido dentro del tubo.

Figura 5-3. Manómetros de líquido



Los líquidos más usados en los manómetros de líquido son agua, mercurio y alcohol. El agua y el mercurio son frecuentemente usados, porque su gravedad específica, coeficiente de expansión y su masa son conocidas. La gravedad específica del agua es 1.0 mientras que la del mercurio es 13.6. Esto significa que se necesita 13.6 veces más presión, para elevar la columna de mercurio con la misma unidad de longitud en una columna de agua. Si tenemos una columna de líquido de 1 metro, la presión medida en una columna de agua es de 98.1 mBar y en una columna de mercurio 1334.2 mBar.

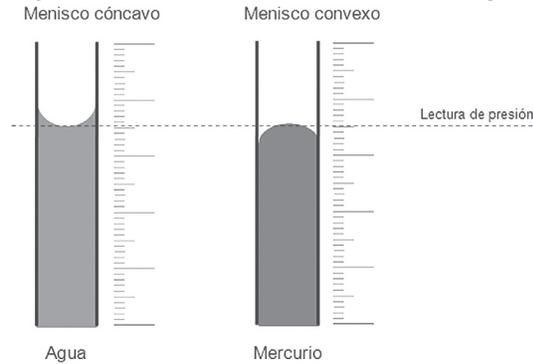
Esto indica que los manómetros de líquido son usados para medición de bajas presiones con alta precisión.

La precisión del manómetro de líquido depende de varios factores como: el tipo de graduación, la forma como se instala y la tensión superficial sobre la columna (menisco).

Los meniscos deben tenerse en cuenta, para evitar errores de paralelaje en la lectura. En el caso del mercurio el menisco es convexo, porque las mo-

lécúlas del mercurio se adhieren más a la pared del tubo que entre sí. En el caso del agua y el alcohol el menisco es cóncavo, porque las moléculas de este líquido se adhieren más entre sí que a las paredes del tubo (Ver figura 5-4).

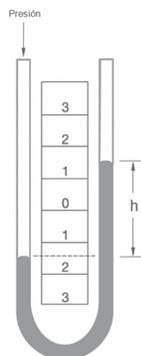
Figura 5-4. Lectura en manómetro de líquido



5.3.1. Tubo en U

Es el instrumento más antiguo y sencillo para medir presión. Un tubo en U se fabrica normalmente en vidrio, se rellena parcialmente con un líquido y ambos extremos están inicialmente abiertos. Cuando una presión P_1 va a ser medida, esta se aplica en uno de los extremos del tubo, mientras que el otro permanece abierto a la atmósfera. La medida de presión es usualmente expresada en milímetros o pulgadas de líquido.

Figura 5-5. Tubo en U



Matemáticamente puede expresarse su funcionamiento por medio de la ecuación 2:

$$P_1 - P_2 = d \times h$$

Donde:

P_1 : Presión del proceso.

P_2 : Presión de referencia.

d : Densidad.

h : Altura del líquido.

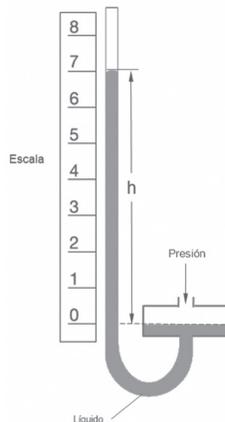
Ecuación 5-2. Cálculo de presión en tubos en U.

El tubo en U puede ser usado para medir presión manométrica (una de las tomas referenciada a la atmósfera), presión absoluta (presión negativa con relación al extremo abierto referenciado a la atmósfera) y presión diferencial (las dos tomas conectadas al proceso).

5.3.2. Manómetro de columna

Su funcionamiento es semejante al tubo en U, pero en este diseño un brazo es reemplazado por un recipiente de gran diámetro. De esta forma, la presión del proceso es indicada solo por la altura de la columna. La relación de diámetros es importante y debe ser la mayor posible para reducir los errores resultantes del cambio de nivel en recipiente de mayor diámetro.

Figura 5-6. Manómetro de columna



Matemáticamente puede expresarse su funcionamiento por medio de la ecuación 3:

$$P_2 - P_1 = d \times \left(1 + \frac{A}{B}\right) \times h$$

Donde:

P_1 : Presión del proceso.

P_2 : Presión de referencia.

d : Densidad.

A : Área brazo de menor diámetro.

B : Área brazo de mayor diámetro.

h : Altura en pulgadas o centímetros.

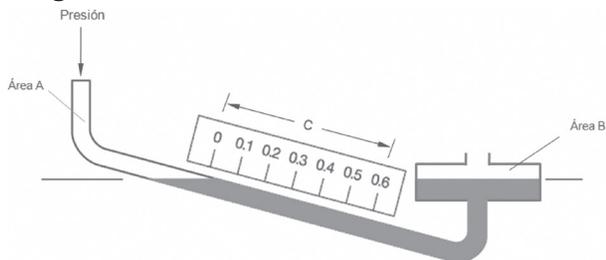
Ecuación 5-3. Cálculo de presión en manómetros de columna.

Su rango de trabajo normalmente va desde 0-12" hasta 0-48" de agua o mercurio. Se usa normalmente como instrumento patrón en laboratorio, para calibrar instrumentos de baja presión y vacío, al igual que instrumentos de presión diferencial.

5.3.3. Tubo en U inclinado

Su principio es semejante al tubo en U convencional, pero uno de sus brazos se inclina para incrementar la sensibilidad de la lectura, por lo que se llama medidor de precisión y se usa como patrón de presión relativa y diferencial.

Figura 5-7. Manómetro de tubo en U inclinado



$$P_2 - P_1 = d \times \left(1 + \frac{A}{B}\right) \times C \times \text{Sen} \alpha$$

Donde:

P_1 : Presión del proceso.

P_2 : Presión de referencia.

d : Densidad.

A : Área brazo de menor diámetro.

B : Área brazo de mayor diámetro.

C : Longitud de la escala.

α : Ángulo inclinación.

Ecuación 5-4. Cálculo de presión en manómetros tubo en U inclinados.

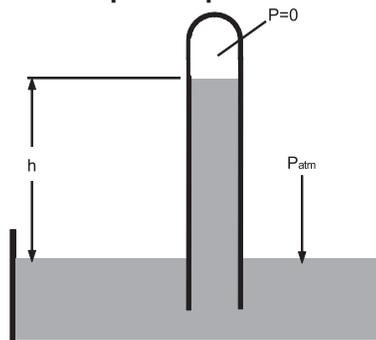
Tabla 5-2. Características manómetros de líquido

	Tubo en U	Manómetro columna	Tubo en U inclinado
Rango	0-5 inHg hasta 0-50 inHg 0-5 in inH ₂ O hasta 0-100 inH ₂ O	0-2 inHg hasta 0-100 inHg 0-2 in inH ₂ O hasta 0-100 inH ₂ O	0-4 inH ₂ O hasta 0-20 inH ₂ O
Precisión	0.02 in	0.02 in	0.005 in
Costo	Bajo	Bajo/ medio	Medio
Material tubo	PVC, Vidrio	Vidrio	Acrílico, vidrio

5.3.4. Barómetro

Un barómetro es un manómetro de columna que indica cambios en la presión atmosférica. En su forma más sencilla, el barómetro está fabricado de un tubo de vidrio con un extremo sellado y relleno de mercurio. El tubo es invertido y su extremo abierto, colocado en un recipiente con mercurio. La presión atmosférica sobre la superficie del mercurio contenido en el recipiente mantiene la columna del líquido dentro del tubo. La presión atmosférica estándar sobre el nivel del mar, corresponde a una altura de 760 mm de mercurio.

Figura 5-8. Principio de operación del barómetro



Resumen manómetros de líquido

Ventajas

Medición y construcción simple

Pueden medir bajas presiones y vacío hasta 1 mTorr

Costo relativamente bajo

Buena precisión

Desventajas

Los cambios de temperatura provocan cambios de densidad

El uso de mercurio está limitado por su toxicidad

Para la medición es necesario tener en cuenta la tensión superficial del líquido (meniscos) y el error de paralelaje

5.4. MANÓMETROS MECÁNICOS

Los manómetros de líquido son de gran precisión, pero tienen el inconveniente que solo pueden ser usados para presiones relativamente pequeñas. Por el contrario, los manómetros mecánicos cubren un amplio rango de aplicaciones desde vacío hasta 80.000 psi.

5.4.1. Tubo Bourdon

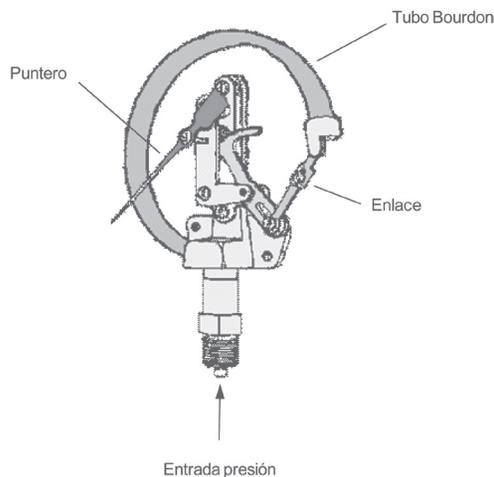
El tubo Bourdon en su forma más simple, es un tubo de metal curvado en forma de C, espiral o helicoidal. El extremo abierto del tubo Bourdon se conecta al proceso, mientras que el extremo cerrado se conecta a un indicador a través de articulaciones y a través de una barra de fuerza a un transmisor.

Los tubos Bourdon se fabrican en diferentes materiales como bronce fosforado, cobre-berilio, acero al carbón, acero inoxidable y aceros especiales.

5.4.1.1. Tubo Bourdon en C

Es un tubo curvado en forma de C, aproximadamente 270° de la circunferencia, de pared delgada y sección transversal elíptica. Uno de los extremos está montado rígidamente en la línea de presión y el otro extremo está cerrado y libre para permitir movimiento por efecto de la presión del fluido. La presión del fluido tiende a enderezar el extremo libre, el que está unido por medio de piñones y engranajes a un puntero para indicar la presión del proceso sobre una carátula.

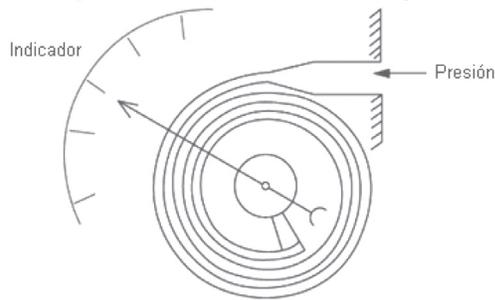
Figura 5-9. Tubo Bourdon C



5.4.1.2. Tubo Bourdon en espiral

En este tipo de instrumento se amplifica el movimiento de un tubo Bourdon C, curvando el tubo unas cuantas vueltas (normalmente cuatro), formando un elemento de espiral plano, que permite eliminar el mecanismo multiplicador logrando una respuesta uniforme, con mayor precisión y alta sensibilidad a los cambios pequeños de presión. La forma del espiral permite soportar sobrecargas sin deformación, lo que permite la medición de bajas presiones con alta precisión, en todo el rango de medición.

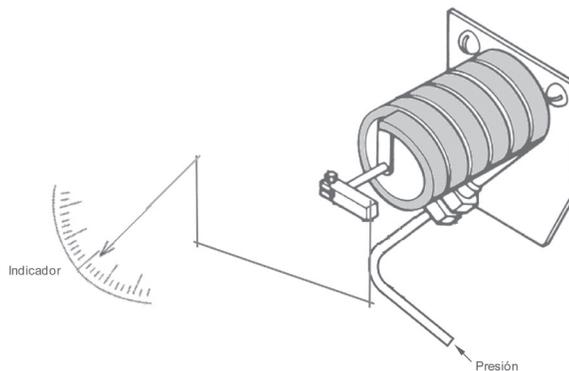
Figura 5-10. Tubo Bourdon espiral



5.4.1.3. Tubo Bourdon helicoidal

Este medidor está formado por un tubo Bourdon más ancho y más largo que el tipo C, doblado para formar un resorte helicoidal, desde ocho hasta dieciséis vueltas, dependiendo del rango de presión y el material de tubo seleccionado.

Figura 5-11. Tubo Bourdon helicoidal



Uno de los extremos del resorte helicoidal se encuentra fijo a la base donde se aplica la presión del proceso, mientras que el otro extremo se encuentra libre para moverse. Los cambios de la variable medida son transmitidos por elementos mecánicos al puntero, donde se puede visualizar la presión.

Al igual que el tubo Bourdon espiral, en el tubo Bourdon helicoidal su mecanismo multiplicador es más sencillo, pero con una menor sensibilidad. Puede medir altas presiones aun con fluctuaciones continuas y con condiciones severas del proceso.

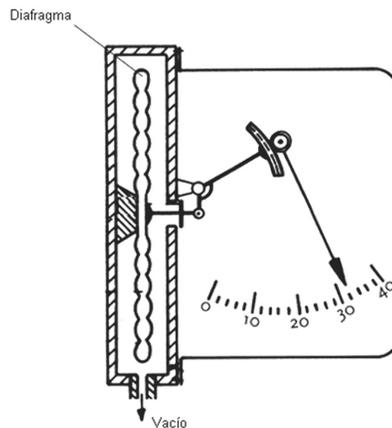
Resumen manómetros con Bourdon

Ventajas
Bajo costo
Gran variedad de materiales y rangos de medición
Desventajas
Respuesta lenta comparado con los fuelles y diafragmas
Sensible a choques y vibraciones

5.4.2. Diafragma

Es un disco flexible, usualmente con corrugaciones concéntricas, que es usado para convertir presión en deflexión. El movimiento del diafragma es muy pequeño, pero uniforme y lineal. La cantidad de movimiento en el diafragma depende del espesor del metal, diámetro, forma de las corrugaciones, módulo de elasticidad y presión aplicada.

Figura 5-12. Medidor de presión por diafragma



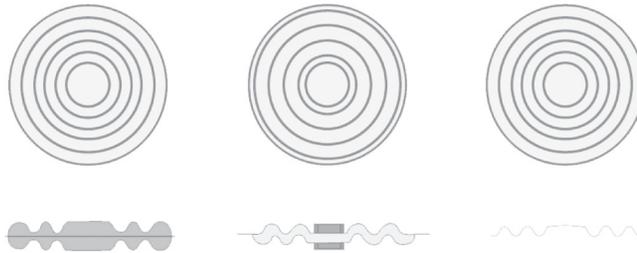
Un diafragma es diseñado para que la característica de la presión vs. deflexión, sea la más lineal posible, sobre un rango específico de medición y con un mínimo corrimiento del punto cero.

Los metales usados para construir diafragmas son bronce, bronce fosforado, cobre-berilio, acero inoxidable, monel, hastelloy C, titanio y tantalio. Tanto la linealidad como la sensibilidad son determinadas principalmente por el número de corrugaciones y el ángulo formado en la cara del diafragma.

Los diafragmas son muy sensibles a los cambios de presión, pero poseen muy baja precisión. Tiene un movimiento uniforme y lineal a los cambios de presión.

Para corregir el pequeño desplazamiento del diafragma, en muchos manómetros se usan cápsulas, fabricadas con dos diafragmas, uno en cada una de sus caras, para poder tener mayor desplazamiento, como resultado de los cambios de presión.

Figura 5-13. Tipos de diafragmas



Resumen manómetros con diafragmas

Ventajas
Fuerza grande
Gran variedad de materiales y rangos de medición
Desventajas
Capacidad limitada
Sensible a la posición de montaje

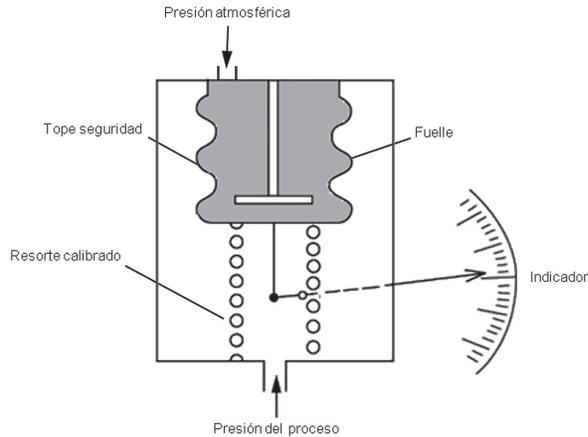
5.4.3. Fuelle

Un fuelle en esencia es un tubo metálico de paredes delgadas y corrugadas, que permite la expansión y contracción por efecto de la presión.

Los materiales usados para construir fuelles son bronce, bronce fosforado,

cobre-berilio, monel, acero inoxidable e inconel. Son usados en aplicaciones que requieren recorridos y fuerzas grandes, como indicadores de presión, registradores y como elementos de realimentación en transmisores y controladores neumáticos.

Figura 5-14. Fuelle



Resumen manómetros con fuelles

Ventajas
Compacto y preciso
Desventajas
Uso limitado de materiales para su construcción
Puede ser sensible a la posición de montaje

Tabla 5-3. Características manómetros mecánicos

	Tubo Bourdon	Diafragma	Fuelle
Rango presión	0 -12 psi hasta 0 - 60000 psi	0 -10 inH ₂ O hasta 0 -15 psi	0 -1 inHg hasta 0 -30 psi
Rango vacío	0-5 inH ₂ O de vacío hasta 0-30 inHg de vacío	0-10 inH ₂ O de vacío hasta 0-30 inHg de vacío	0-1 inHg de vacío hasta 0-30 inHg de vacío
Rango presión compuesta	30 in Hg de vacío - 15 psi hasta 30 in Hg de vacío - 30 psi	Span mín. de 0-10 inH ₂ O hasta 30 in Hg de vacío - 10 psi	Span mín. de 1 inHg hasta Span de 30 psi
Temperatura	-40 hasta 190°C	-40 hasta 190°C	-40 hasta 190°C

5.5. MEDIDORES DE VACÍO

El término vacío se refiere al rango de presión que se encuentra por debajo de la presión atmosférica, hasta presiones tan bajas como 10^{-14} mBar.

De acuerdo al valor de vacío, este puede dividirse en cinco rangos denominados: vacío leve, vacío medio, alto vacío, ultra alto vacío y vacío extremo.

Tabla 5-4. Rangos de vacío

Definición	Abreviatura	Rango de presión
Vacío leve	-	$1\text{mBar} \leq p < \text{presión atmosférica}$
Vacío medio	-	$10^{-3} \leq p < 1\text{mBar}$
Alto vacío	HV	$10^{-7} \leq p < 10^{-3}$
Ultra alto vacío	UHV	$10^{-12} \leq p < 10^{-7}$
Vacío extremo	XHV	$p < 10^{-12}$

5.5.1. Clasificación de los medidores de vacío

Los medidores de vacío pueden ser clasificados en dos grupos: de lectura directa y de lectura indirecta.

5.5.1.1. Medidores de lectura directa

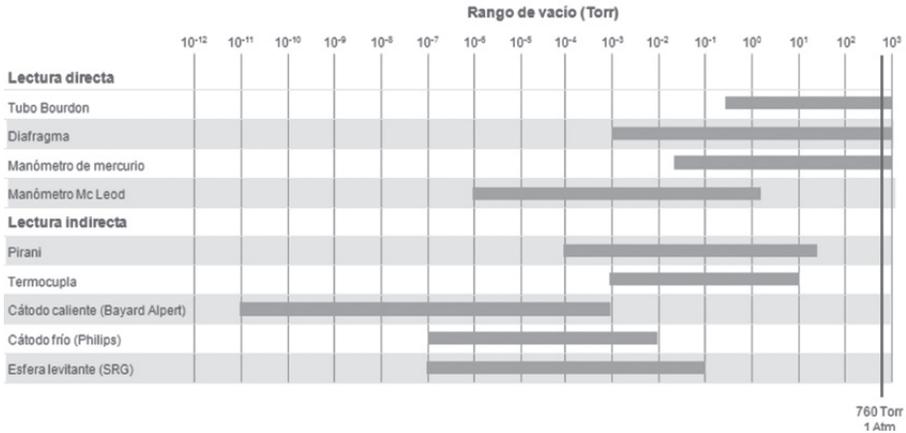
Los instrumentos que miden la presión como la fuerza que actúa sobre un área son denominados medidores de lectura directa o manómetros de vacío absoluto.

De acuerdo a la ley cinética de los gases, la fuerza que ejercen las partículas de gas a través de su impacto con las paredes del medidor, depende del número de moléculas de gas por unidad de volumen y de su temperatura, pero no de la masa molecular del gas. En esta clasificación se incluyen los manómetros de tubo Bourdon, diafragmas, tubo en U y manómetro McLeod.

5.5.1.2. Medidores de lectura indirecta

En los medidores de lectura indirecta, la presión es determinada como una función dependiente de la densidad o propiedades del gas (conductividad térmica, ionización, conductividad eléctrica, etc.). Estas propiedades son dependientes de la masa molecular y también de la presión. La lectura de presión es dependiente del tipo de gas.

Tabla 5-5. Resumen medidores de vacío



5.5.2. Manómetro McLeod

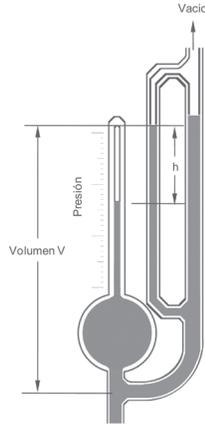
Este medidor de vacío de lectura directa fue diseñado por Herbert McLeod en 1874 y es de poco uso en la actualidad. Es usado para medición de presión absoluta en el rango de alto vacío, que está por debajo de 10⁻⁵ mBar.

Consiste en un bulbo con tubo capilar cerrado en su extremo superior, un tubo de conexión al sistema de vacío y un sistema de presurización o inclinación, para elevar el mercurio y comprimir la muestra de gas atrapada en el bulbo.

El manómetro McLeod comprime con mercurio la muestra de gas del sistema que está siendo medido, con el propósito de lograr mayor sensibilidad aplicando la ley de Boyle-Mariotte ($P_0 \cdot V_0 = P_1 \cdot V_1 = \text{constante}$).

El principio de compresión permite solamente, la medición de la presión parcial de gases no condensables. El incremento de presión obtenida, eleva el nivel de mercurio y este cambio de altura puede ser medido de la misma forma, como se realiza con un tubo en U.

Figura 5-15. Manómetro McLeod



El principio de funcionamiento puede ser expresado mediante la ecuación 5-5.

$$P = \frac{A \times h^2}{V}$$

Donde:

P: Presión.

A: Área del capilar.

H: Altura.

V: Volumen.

Ecuación 5-5. Cálculo de presión en manómetros McLeod.

Por ser un medidor de presión que deriva su funcionamiento en relaciones lineales, es usado como patrón de vacío de otros medidores. Permite la medición de vacío desde 1 hasta 10^{-6} Torr.

Resumen medidor McLeod

Ventajas

Medición simple y confiable

Puede ser usado como patrón de calibración, de otros medidores de vacío

Desventajas

Uso limitado para aplicaciones estáticas (no apto para medición continua).

Frágil

Puede presentarse contaminación por vapores de mercurio

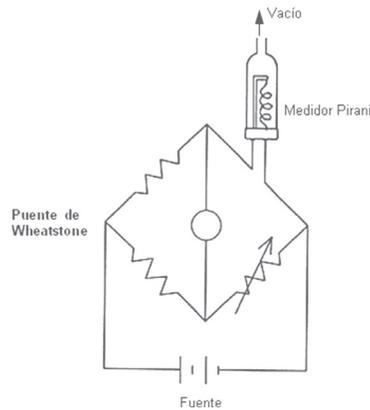
El uso de mercurio está limitado por su toxicidad.

5.5.3. Medidor Pirani

El Pirani es uno de los más antiguos medidores indirectos, que aún sigue siendo usado en la actualidad.

En su forma más simple, el medidor Pirani consta de un alambre delgado fabricado de tungsteno, platino o níquel e instalado en un ambiente sometido a vacío.

Figura 5-16. Medidor Pirani



El filamento cuya resistencia es proporcional a la temperatura, está instalado en uno de los brazos de un puente de Wheatstone. Por el filamento circula corriente y produce calor que interactúa con el gas que va a ser medido. Cuando la presión (vacío) cambia, la conductividad térmica cambia produciendo variación de temperatura en el filamento.

La temperatura del filamento depende de las pérdidas por convección del gas medido. A mayor presión, menor temperatura del filamento y viceversa.

En este medidor, la temperatura del filamento se mantiene constante; a mayor presión más energía es necesaria para calentar el filamento. Esta variación de energía es convertida a presión por un circuito electrónico.

El medidor Pirani puede medir presiones entre 10 y 10^{-4} Torr.

Resumen medidor Pirani

Ventajas

Bajo costo

Precisión relativamente buena (2% en el punto de calibración)

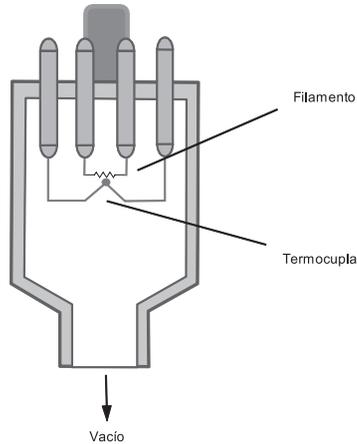
Desventajas

Medición no lineal por debajo de 10^{-4} Torr

5.5.4. Medidor tipo termocupla

Está constituido por un filamento y una termocupla que está soldada en el punto medio del filamento, para poder tener medición directa de la temperatura sobre él.

Figura 5-17. Medidor tipo termocupla



El filamento es calentado haciendo pasar una corriente constante entre 20 y 200 mA. Con esta corriente pasando por el filamento, la temperatura aumenta cuando la presión disminuye, debido a que existe una menor cantidad de moléculas en el entorno del filamento.

La salida de la termocupla es directamente proporcional al aumento de temperatura en el filamento e inversamente proporcional a los cambios de presión.

Como la conductividad térmica varía con los gases, el medidor debe ser calibrado de acuerdo al gas medido para mejor precisión. Estos medidores cubren el rango de 10^{-14} a 1 Torr.

Resumen medidor tipo termocupla

Ventajas

- Menor costo que el medidor Pirani
- Precisión relativamente buena

Desventajas

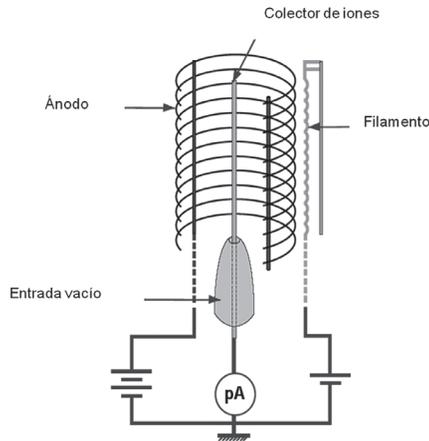
- Debe calibrarse para cada gas, debido a los cambios de conductividad térmica.
- No recomendado para atmósferas con presencia de aceite

5.5.5. Medidor de cátodo caliente

Está formado por tres electrodos (cátodo, ánodo y colector) donde el cátodo es el elemento que está caliente. El cátodo inicialmente era fabricado de tungsteno, pero actualmente se usan aleaciones de iridio, para hacerlo más resistente al oxígeno. El cátodo caliente es una fuente muy grande de electrones. Los electrones son acelerados en el campo eléctrico y reciben suficiente energía del campo para ionizar el gas en el lugar donde los electrones están localizados. Los iones cargados positivamente son acelerados hacia el colector donde generan una corriente en el circuito detector de iones. La cantidad de corriente generada es proporcional a la densidad de gas y por lo tanto de la presión (vacío).

La mayoría de sensores de cátodo caliente, miden en un rango de 10^{-2} a 10^{-10} Torr.

Figura 5-18. Medidor de cátodo caliente



Resumen medidor cátodo caliente

Ventajas

- Buena linealidad.
- Medición de vacío hasta 10^{-16} Torr

Desventajas

- Puede contaminarse el medio, debido a la descomposición del filamento caliente.
- Sensible a la vibración.

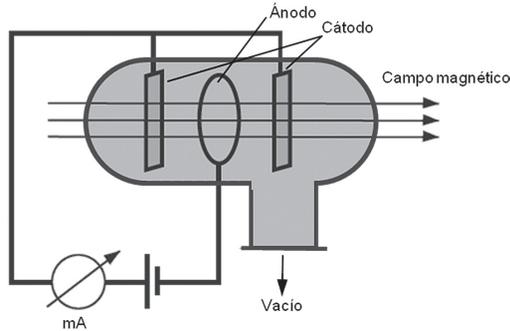
5.5.6. Medidor de cátodo frío

En el medidor de cátodo frío los electrones son desprendidos de la super-

ficie del electrodo por un campo de gran potencia. En el diseño Phillips, un campo magnético alrededor de tubo deflecta los electrones, causando que ellos se muevan a través del campo magnético hacia el ánodo. El movimiento incrementa la oportunidad que ellos se encuentren y ionicen moléculas.

El rango de medición normalmente es de 10^{-5} a 10^{-2} Torr.

Figura 5-19. Medidor de cátodo frío



Resumen medidor cátodo frío

Ventajas

- No hay filamentos que puedan quemarse.
- No es afectado por la entrada de aire.
- Insensible a la vibración.

Desventajas

- Rango de medición limitado.

5.5.7. Medidor de esfera levitante (*Spinning Rotor Gage*)

El medidor de esfera levitante se basa en el principio que la fricción de los gases es dependiente de la presión. Este método permite medición de presiones, en el rango de medio y alto vacío.

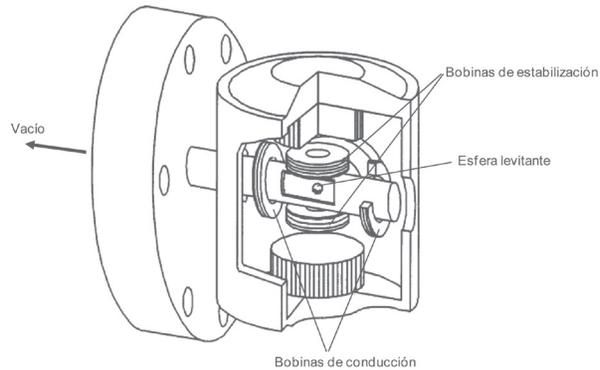
El elemento de medición usado es una esfera de acero de unos pocos milímetros de diámetro, suspendida sin fricción por medio de un campo magnético. La esfera se hace rotar, usando pulsos electromagnéticos aplicados a las bobinas de conducción. Cuando la esfera alcanza una alta velocidad de rotación (400 revoluciones por segundo), se detiene la alimentación a las bobinas de conducción. La esfera permanece suspendida por sí misma en el vacío. Su velocidad de rotación decrece más o menos rápido dependiendo de la fricción

del gas, la cual es dependiente de la cantidad de presión en el interior de la cámara de medición.

La unidad electrónica es usada para medir la desaceleración de la esfera y convertir este valor en una medida de presión.

El medidor de esfera levitante puede medir presiones en el rango de 10^{-2} y 10^{-7} Torr.

Figura 5-20. Medidor de esfera levitante



Resumen medidor de esfera levitante

Ventajas

Construcción simple del sensor

Buena exactitud (1%), por eso se usa como patrón secundario.

Medición de vacío a altas temperaturas (450°C)

Desventajas

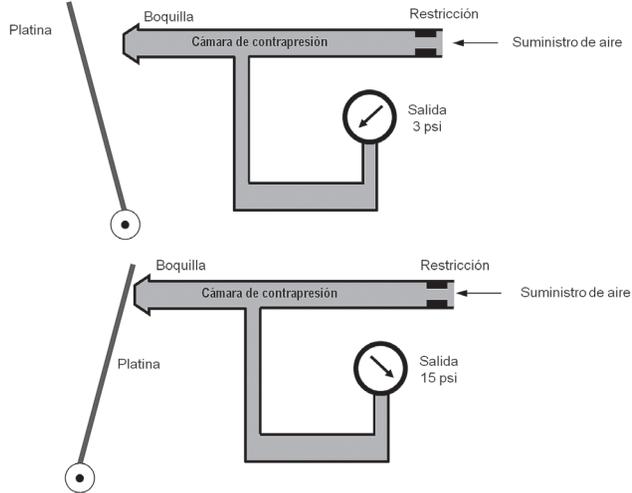
La lectura de presión, depende de la composición del gas.

Debe ser usado en ambientes controlados y libres de vibraciones.

5.6. TRANSMISORES NEUMÁTICOS DE PRESIÓN

Los transmisores neumáticos se basan en el conjunto platina-boquilla, para producir una señal de salida neumática proporcional a la salida del sensor.

Figura 5-21. Principio operación del conjunto platina-boquilla

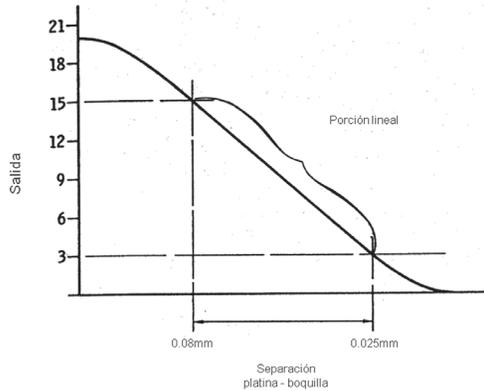


La platina es montada directamente frente a la boquilla y acoplada mecánicamente al sensor. El suministro de aire es conectado a la restricción. El compartimiento de contrapresión está compuesto por la relación de volumen entre la boquilla y la restricción. La configuración típica, se muestra en la figura 5-21. La función del conjunto platina-boquilla, es convertir un pequeño desplazamiento de la platina en una contrapresión proporcional.

Si distanciamos la platina de la boquilla, el aire se escapa sin restricción a través de la boquilla. En este caso la presión en el compartimiento de contrapresión, es cercana a la presión atmosférica. Si desplazamos la platina para que esté en contacto con la boquilla, el flujo de aire a través de la boquilla se reduce al mínimo. En este caso la contrapresión estaría cerca de la presión de suministro.

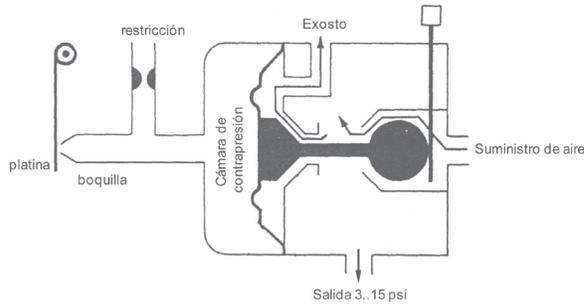
El cambio de la posición de la platina respecto a la boquilla es de tan solo 0.025 mm, pero sirve para producir un cambio de la salida del transmisor en un rango de 3 a 15 psi.

Figura 5-22. Relación distancia platina-boquilla vs. salida transmisor



El corazón del transmisor neumático es el relevador o amplificador neumático. La entrada se encuentra conectada a la cámara de contrapresión del conjunto platina-boquilla. Cuando la presión en la cámara de contrapresión se acerca a la presión de suministro (platina tapando la boquilla), la salida del relevador tiende a 3 psi. Si por el contrario la presión en la cámara de contrapresión se acerca a la presión atmosférica (platina alejada de la boquilla), la salida tiende a 15 psi.

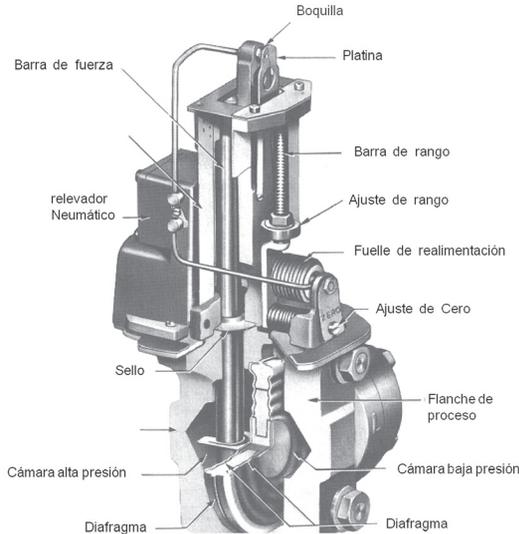
Figura 5-23. Relevador neumático



En la figura 5-24 se muestran las partes de un transmisor neumático de presión diferencial. El elemento primario de presión es un diafragma (cápsula), que sensa la presión de las cámaras de alta presión (*High Pressure*) y baja presión (*Low Pressure*). El diafragma está conectado directamente a la barra de fuerza y esta conectada a su vez a la platina. El cambio de la posición del diafragma debido a los cambios de presión diferencial, se transmite directa-

mente a la platina por medio de la barra de fuerza. La salida del transmisor neumático (3...15 psi) es proporcional a la presión diferencial, en el rango de calibración del instrumento.

Figura 5-24. Partes de un transmisor neumático



Como el diámetro de la tobera es muy pequeño (0.1 a 2 mm) los transmisores neumáticos son susceptibles a presentar problemas de operación debido a que las partículas como aceite, polvo, etc., pueden tapar las partes internas del instrumento.

Resumen transmisores neumáticos

Ventajas

- Pueden usarse sin limitaciones, áreas con riesgo de explosión.
- Bajo costo de instalación, en zonas clasificadas.

Desventajas

- Requiere mantenimiento frecuente de los elementos mecánicos, que pueden afectarse por la contaminación del aire
- Requieren aire de buena calidad limpio (seco, libre de aceite y regulado).

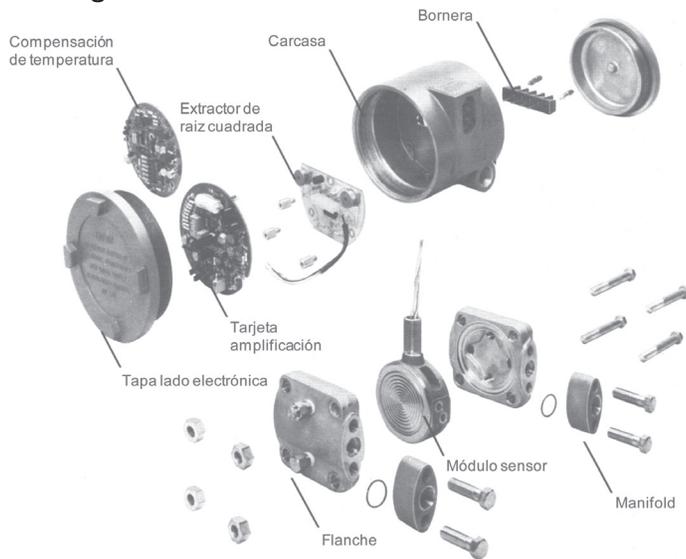
5.7. TRANSMISORES ELECTRÓNICOS DE PRESIÓN

Son instrumentos que responden a los cambios de la presión de proceso (manométrica, absoluta o diferencial), por medio de un elemento sensor y convierte la variable medida en una señal de 4...20 mA.

Un transmisor de presión normalmente está constituido por los siguientes elementos:

1. Módulo sensor.
2. Tarjeta de amplificación.
3. Tarjeta de compensación de temperatura.
4. Tarjeta de extracción de raíz cuadrada (solo necesaria en aplicaciones de flujo por presión diferencial).
5. Bornera de conexiones.

Figura 5-25. Partes de un transmisor electrónico



El módulo sensor convierte los cambios de presión (o presión diferencial) en una señal eléctrica. El sensor normalmente está constituido por diafragmas y un líquido de relleno, que transfiere la presión del fluido, al circuito de medición. Esto permite aislar el circuito de medición, de las condiciones de críticas del proceso como temperatura, fluidos corrosivos, humedad, etc.

Existen diferentes métodos para convertir los cambios de presión en señal

eléctrica. Los más usados en la actualidad son de tipo resistivo, capacitivo, piezorresistivo e inductivo (LVDT).

Algunos transmisores requieren compensación de temperatura, para reducir el error debido a los cambios de densidad del fluido, contenido en el módulo sensor. En los transmisores que incorporan microprocesadores, se realiza compensación automática de la temperatura, por medio de un sensor que normalmente está incorporado en el módulo sensor.

Cada fabricante diseña su propio sensor y una electrónica apropiada para el mismo.

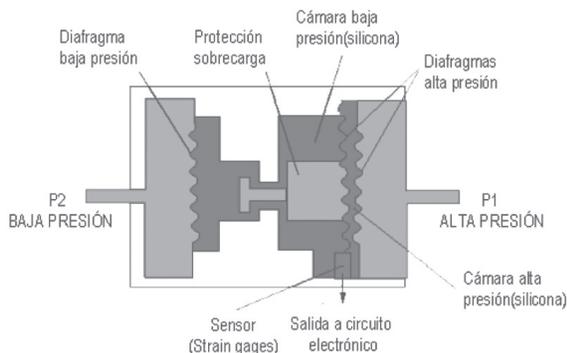
5.7.1. Transmisores resistivos de presión

Son sensores basados en Strain Gages, que son elementos que miden deformación y en esta aplicación convierten la presión en cambios pequeños de resistencia. El cambio de resistencia es medido en las cuatro ramas de un circuito de puente de Wheatstone, donde se encuentran instalados los Strain Gages.

La operación del sensor comienza cuando una presión hidráulica causa una deflexión mecánica en el elemento. La deflexión mecánica transmitida al elemento sensible causa un cambio en resistencia. Los Strain Gages se fabrican de un alambre fino, envuelto en placas de material no conductor y pegados al diafragma del transmisor de presión. Como la presión medida cambia, los Strain Gages son sometidos a deflexión y dependiendo del lugar de montaje, se incrementa o decrementa su resistencia. Cuando los Strain Gages son configurados en un puente de Wheatstone, la salida eléctrica será proporcional a la presión aplicada.

Se usan para medir presiones, normalmente hasta 600 Bar.

Figura 5-26. Celda de presión resistiva



Resumen transmisores resistivos

Ventajas

- Tamaño pequeño.
- Medición y construcción simple.
- Relativo bajo costo.
- Buena precisión y repetibilidad.
- Amplio rango de presión (5 hasta 10.000 psig).

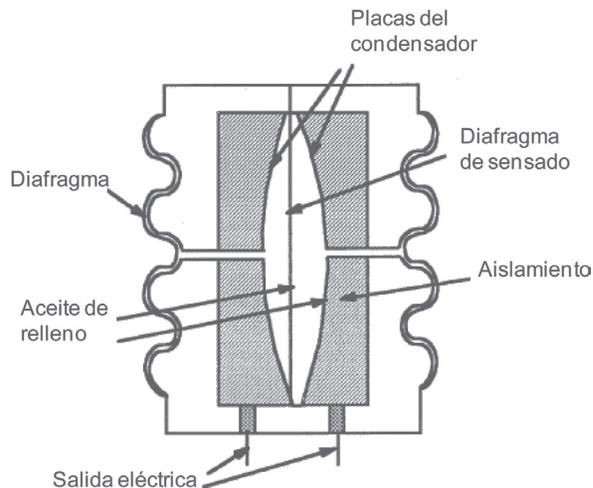
Desventajas

- Sensible a los cambios de temperatura ambiente.

5.7.2. Transmisores capacitivos de presión

La medición de presión por medio de capacidad, típicamente usa un diafragma posicionado entre dos placas fijas de un condensador. Un diafragma es usado para proteger el elemento sensor de la presión directa del proceso. Un medio de transferencia como aceite de silicona, es usado para conducir la presión del proceso hasta el diafragma. Los cambios en la capacidad son medidos por un circuito electrónico, usualmente variando la frecuencia de oscilación o formando un puente de capacitancias. El circuito electrónico es diseñado específicamente para el tipo de sensor usado.

Figura 5-27. Celda capacitiva de presión



Resumen transmisores capacitivos

Ventajas

Buena precisión, histéresis, repetibilidad y estabilidad.
Excelente resolución.

Desventajas

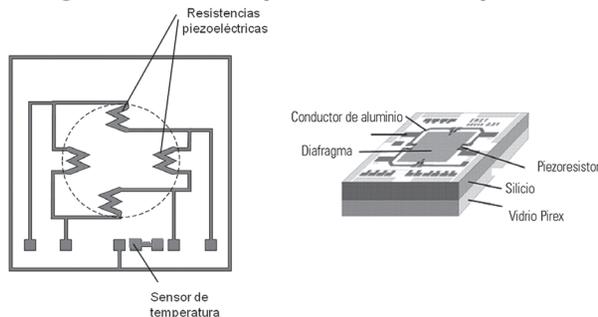
Sensibilidad a los cambios de temperatura, por lo cual requiere compensación de temperatura ambiente.
Salida no lineal del sensor, por eso su uso comenzó a ser frecuente, con la aparición de los transmisores inteligentes.

5.7.3. Transmisores de presión piezorresistivos

Piezolectricidad es la propiedad que tienen algunos materiales de convertir energía mecánica en energía eléctrica o viceversa. Debido a esta propiedad, cristales como cuarzo, titanato de bario y sulfato de litio, pueden ser empleados como transductores de presión, para producir potencial eléctrico cuando se aplica presión al cristal. El efecto piezoeléctrico es un fenómeno reversible. Si un potencial eléctrico es conectado a determinadas aristas de un cristal, se generará un cambio de la forma. Este efecto es altamente estable y preciso, para ser utilizado, por ejemplo, en controles de tiempo, como relojes de cuarzo.

La carga debido a una alteración de la forma es generada por una energía auxiliar, teniendo en cuenta que el cuarzo es un elemento transmisor activo. Esa carga es conectada a una entrada de un amplificador, siendo indicada o convertida en el instrumento de medición.

Figura 5-28. Celda piezorresistiva de presión



Los transmisores piezoeléctricos son prácticos para medición de procesos dinámicos. Ellos pueden ser utilizados para medición de fluctuaciones rápidas

y presiones desde 1 mBar hasta 10.000 Bar. Su precisión oscila entre 0.1 y 10% de la escala total. La estabilidad térmica va desde -200°C hasta 400°C. Puede ser usado en condiciones extremas, como por ejemplo para medición de presión generadas en motores de combustión interna.

Resumen celda piezorresistiva

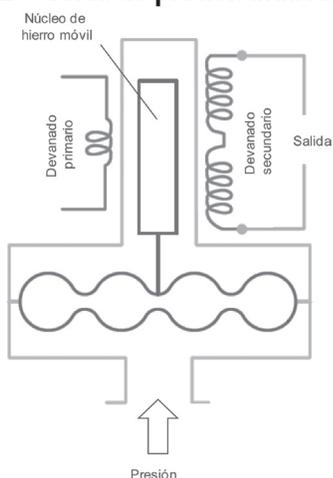
Ventajas
Rangos de medición muy altos, aún con relativas altas temperaturas.
Pueden ser usados para medir vibración, aceleración o presión.
Altos niveles de señal de salida.
Construcción robusta.
Desventajas
Sensible a los cambios de temperatura, por eso es necesario medirla y compensarla.

5.7.4. Transmisores inductivos de presión

El sensor de inductancia variable usado para medición de presión, aplica los principios básicos de los transformadores diferenciales (LVDT) y los sensores inductivos de ranura. El transformador diferencial lineal variable contiene una bobina primaria y dos bobinas secundarias. La bobina primaria es excitada con una fuente de voltaje AC (típicamente 5VAC rms). Los cambios en la presión, provocan un cambio en la salida en niveles de 40 mV/V.

Cuando se aplica presión al diafragma, se deflecta y produce un desplazamiento del núcleo, que provoca un cambio en el voltaje de salida.

Figura 5-29. Celda de presión inductiva LVDT



Resumen celda inductiva

Ventajas

Rangos de medición muy bajos o muy altos.

Altos niveles de señal de salida.

Construcción robusta.

Desventajas

Limitada capacidad de sobrepresión.

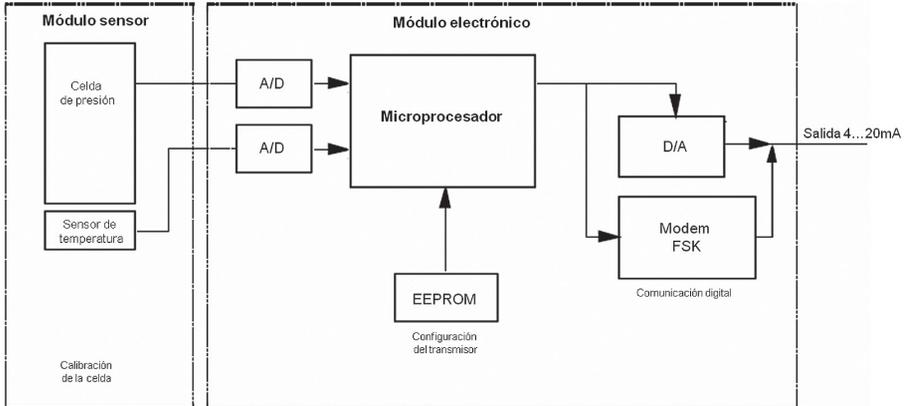
Es susceptible a corrimiento (*drift*), en función del tiempo de uso

Menor estabilidad que los demás sensores de presión digitales.

5.8. TRANSMISORES INTELIGENTES

Se denominan transmisores inteligentes o Smart y son aquellos equipos que incorporan funciones adicionales a la medida de la variable, gracias a la incorporación del microprocesador en su electrónica.

Figura 5-30. Diagrama de bloques de un transmisor inteligente



Un transmisor estándar solo envía una señal análoga de 4...20 mA, proporcional a la presión medida. Con la incorporación del microprocesador, un transmisor inteligente dispone de funciones adicionales, a la señal análoga de salida como:

1. Mejor desempeño en exactitud, rango de ajuste (*turndown*) y el efecto reducido de la temperatura ambiente, con respecto a los transmisores convencionales.
2. Permitir cambio de rango y unidades de ingeniería, localmente o a distancia, sin necesidad de tener que desmontar el transmisor del proceso, para realizar una nueva calibración.
3. Poseer autodiagnóstico de sus partes internas o condiciones del proceso que se ha excedido, que pueden afectar la operación del equipo, para reportarlo remotamente. El diagnóstico puede incluir error de configuración, falla de comunicaciones, falla en sensor de presión, falla en sensor de temperatura, transmisor fuera de rango, entre otros.
4. Memoria no volátil, con capacidad de almacenamiento de datos del sensor y de las condiciones de procesos. Dependiendo del fabricante, con base

en la información almacenada, se pueden activar funciones avanzadas de diagnóstico.

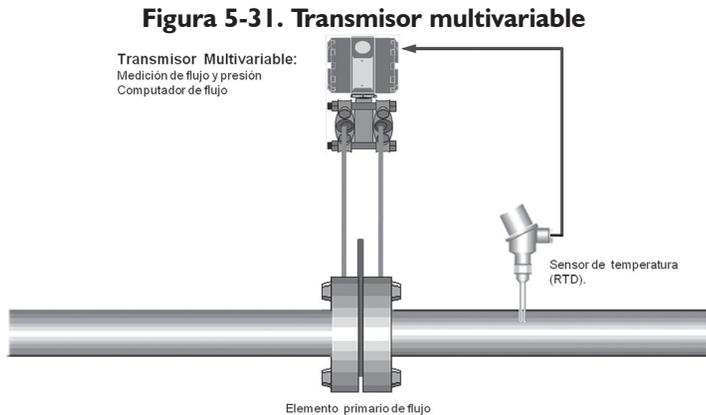
5. Comunicación digital adicional a la salida analógica de 4...20 mA, para configuración y diagnóstico con unidades portátiles de configuración o con interface y computador.
6. Corrección de las curvas no lineales, de los elementos primarios o sensores.

5.9. TRANSMISORES MULTIVARIABLE

Un transmisor multivariable es un sistema usado en aplicaciones industriales para medición de flujo basado en presión diferencial. El transmisor multivariable mide presión diferencial, presión estática y temperatura del proceso, con el fin de realizar cálculos para obtener lectura en unidades de flujo másico o volumen compensado.

Los medidores multivariable pueden ser usados con una gran variedad de elementos primarios de flujo (basados en presión diferencial), como platinas de orificio, tubos Venturi, boquillas y tubos Pitot.

Los transmisores multivariable pueden realizar compensación directa por cambios de densidad, teniendo en cuenta que se realiza medición de presión y temperatura del fluido. Adicionalmente los transmisores multivariable, tienen incorporado un computador de flujo que permite calcular flujo másico o volumen compensado, de acuerdo a las normas industriales como AGA¹, ASME² e ISO³.



La medición de flujo por presión diferencial, sigue todavía siendo muy usada por la amplia base instalada, su versatilidad y porque es una de las tecnologías más estudiadas y mejor entendidas del mercado. Los medidores de flujo basados en presión diferencial, pueden ser usados para medición de líquidos, gases y vapor.

La limitación de los medidores de flujo por presión diferencial, es la pequeña capacidad de ajuste de rango (*turndown*) y la pérdida permanente de presión, que puede ser relativamente alta en algunos de los elementos primarios (ver Medición de flujo, en capítulo 6).

-
1. American Gas Association.
 2. American Society of Mechanical Engineering.
 3. International Organization for Standardization.

BIBLIOGRAFÍA

- C. L., Albert; D.A. Coggan (1996). *Fundamentals of industrial controls*. 2ª edición. Instruments Society of America.
- Douglas M. Considine (1993). *Process Industrial Instruments and Control Handbook*. 4ª edition. McGraw-Hill Inc.
- Dr. Walter Umrath (1998). *Fundamentals of Vacuum Technology*.
- Gary, Navrotski (xxxx). *A vacuum primer*, Advanced desing consulting USA Inc.
- Herman, Julien (1991). *Manual de instrumentos medidores de presión con elementos elásticos*. WIKA.
- Kevin H. L., Chau (1999). *Pressure and Sound Measurement*, CRC Press LLC.
- Omega technologies (1998). *Transactions force related measurements*, Putman Publishind Company and Omega Press LLC.



Capítulo 6

MEDICIÓN DE FLUJO



Navegación en el Canal Beagle, Ushuaia - Argentina

6.1. DEFINICIONES

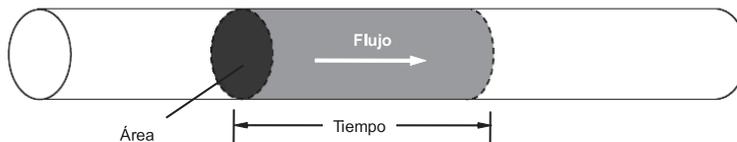
6.1.1. Rata de flujo

Es la unidad de flujo usada para expresar la velocidad de flujo en unidad de tiempo o para indicar qué tan rápido la sustancia se mueve. La rata de flujo es una medida de la distancia, que una partícula de la sustancia puede desplazarse en un periodo específico de tiempo.

6.1.2. Rata de flujo volumétrico

Expresa el volumen de fluido transportado, a través de una tubería en un periodo definido de tiempo. La rata de flujo volumétrico es frecuentemente usada para propósitos de control, donde la confiabilidad y la repetibilidad de la medición son usualmente más importantes que la precisión. Las correcciones por las variaciones causadas por cambios de temperatura y presión, son a veces necesarias para líquidos, mientras que son indispensables en gases, debido a su naturaleza altamente compresible. Normalmente es expresada en unidades como gpm (galones por minuto), l/s (litros por segundo), m³/h, entre otras.

Figura 6-1. Flujo volumétrico



6.1.3. Flujo másico

Medida de la masa actual de un fluido o sólido por unidad de tiempo. Unidades comunes para expresar flujo másico son Kg/h y ton/h.

Actualmente existen dos tecnologías para medición directa de masa y ambas eliminan la necesidad de compensar los cambios en presión y temperatura. El más popular de ellos es el medidor Coriolis, generalmente considerado como la forma más precisa de medir flujo, con precisiones cercanas a las básculas electrónicas. El otro método es el medidor térmico o de dispersión térmica.

El flujo másico también puede ser calculado midiendo la rata de flujo vo-

lumétrico y multiplicado por la densidad, pero este cálculo es menos preciso que la medición directa lograda con los medidores másicos.

$$Q_m = Q_v \times \rho$$

Donde:

Q_m : Flujo másico.

Q_v : Flujo volumétrico.

ρ : Densidad.

Ecuación 6-1. Cálculo del flujo másico.

6.1.4. Totalizador de flujo

Acumulado de la cantidad de flujo, que ha pasado a través de un punto de la tubería y puede ser expresado en unidades de volumen o masa. Los medidores domésticos de agua y gas, son ejemplos de medidores diseñados para registrar el flujo total. En estos casos, no existe referencia del tiempo en la medición. La totalización de flujo es importante para establecer el gasto o consumo de gas, agua, materias primas, etc. en las plantas industriales.

6.2. INFLUENCIA EN EL FLUJO DE FLUIDOS

Las propiedades del fluido (líquido, gas o vapor) incluyen su velocidad, densidad y viscosidad que influyen en la medición del flujo volumétrico. Los siguientes factores son importantes para selección adecuada de un medidor de flujo:

6.2.1. Densidad

Es la masa de un fluido por unidad de volumen. Cuando el fluido es gas, su masa se relaciona directamente con el número de moléculas por unidad de volumen, la cual depende de la temperatura y de la presión. Cuando la temperatura del gas incrementa a presión constante, las moléculas tienden a separarse y decrece la densidad. Si se incrementa la presión a temperatura constante, causa que las moléculas estén más unidas, haciendo el gas más denso. De esta forma los medidores de flujo de gas o vapor deben compensar las variaciones de presión y temperatura midiendo y haciendo la corrección. Es a veces necesario hacer esta misma corrección a los líquidos en elevadas presiones y temperaturas.

Los métodos usados para medir densidad incluyen muestras medidas en laboratorio, lo que hace el proceso de medición complejo y demorado. Si se requiere medición en línea, los medidores tipo Coriolis pueden medir densidad directamente o por medio de medidores radiométricos, se puede realizar medición sin contacto directo con el proceso, ideal en aplicaciones de líquidos corrosivos, tóxicos o en condiciones de alta adherencia o abrasividad.

Los medidores de densidad por radiación miden la atenuación de la energía gamma transmitida a través de la tubería. La atenuación es proporcional a la densidad del material contenido dentro de la tubería.

6.2.2. Viscosidad

Relaciona directamente la facilidad con la cual un fluido circula dentro de una tubería. La viscosidad frecuentemente está medida en unidades de centi-Poise (cP), a una temperatura determinada, que normalmente es 25°C. Cuanto más alto sea el valor de la viscosidad, indica mayor resistencia a fluir. Por ejemplo, a 25°C la viscosidad es de 0.88 cP para agua y 220 cP para aceite motor SAE 30.

En muchos casos cuando se aumenta la temperatura de un líquido, su viscosidad decrece y el flujo dentro de la tubería se facilita. En forma contraria los gases, generalmente son más viscosos debido al incremento de velocidad y su interacción con las moléculas. Sin embargo, muchos fluidos se desvían de este comportamiento típico, siendo necesario conocer con anticipación las características del fluido a ser medido.

Este es el caso de algunos fluidos llamados no-newtonianos, que tienen la característica que la viscosidad cambia con la velocidad del fluido, como es el caso de la salsa de tomate. La salsa de tomate en el frasco, solo fluirá después de agitarla, lo que provee un mínimo esfuerzo necesario para iniciar el movimiento entre las capas del fluido.

6.2.3. Número de Reynolds

El número de Reynolds es un valor adimensional, que describe las condiciones del flujo en un punto en particular. Muchos medidores tienen un comportamiento lineal sobre un rango definido por un número Reynolds mínimo y máximo.

El número Reynolds también es muy útil como indicación si el perfil del fluido se encuentra en condición de flujo laminar o turbulento. El número Reynolds se puede calcular por la siguiente fórmula:

$$R_D = \frac{\rho \times v \times ID}{\mu}$$

Donde:

R_D : Número de Reynolds.

ρ : Densidad.

v : Velocidad del fluido.

ID : Diámetro interno de la tubería.

μ : Viscosidad.

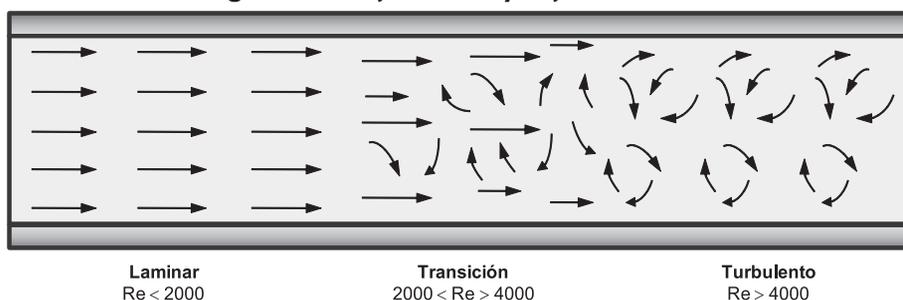
Ecuación 6-2. Determinación del número de Reynolds.

Normalmente el flujo laminar puede ser esperado, si el número de Reynolds es menor de 2.000 y un flujo turbulento si es mayor que 4.000. El rango entre los dos se puede considerar como inestable o en condición de transición.

En el flujo laminar el fluido se mueve en capas ordenadas, con una disminución de la velocidad en los extremos, debido a la rugosidad de las paredes de la tubería. Las capas del centro son las más rápidas produciendo un perfil de flujo en forma de parábola.

Cuando el flujo es turbulento, una mezcla considerable se presenta y las capas en movimiento del fluido son reemplazadas por remolinos aleatorios. Un perfil de flujo turbulento es caracterizado por una forma plana, lo que significa que la velocidad del centro, es aproximadamente la misma que sobre las paredes de la tubería (figura 6-2).

Figura 6-2. Flujo laminar y flujo turbulento



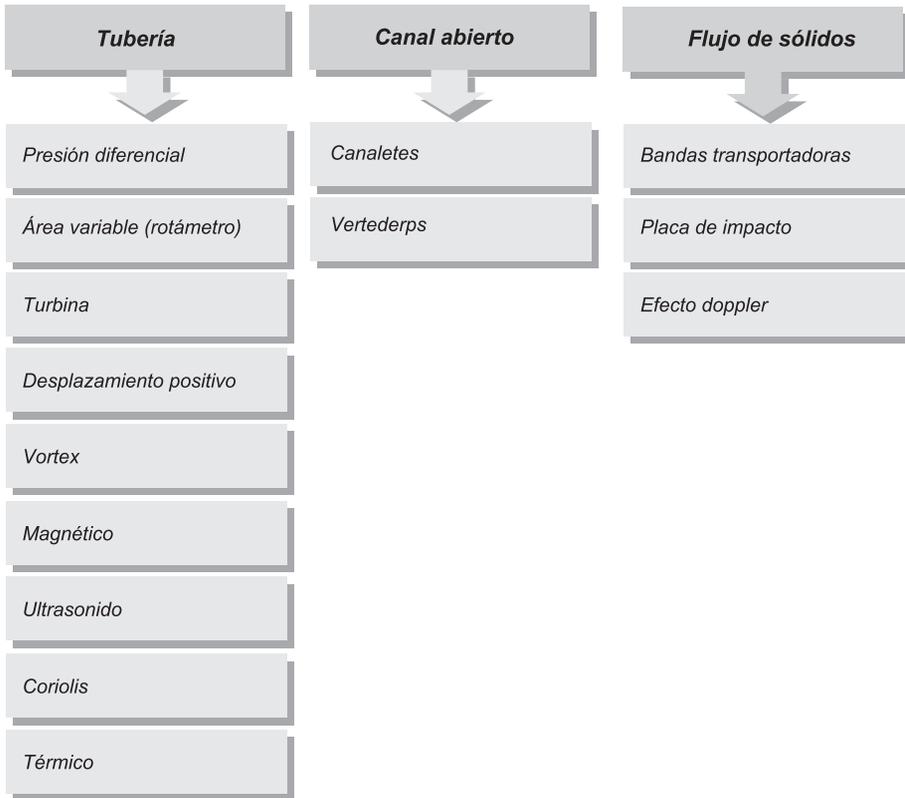
Otro factor que influye en el perfil de flujo son las turbulencias, las cuales ocurren cuando pasa el fluido a través de un elemento que ocasione cambio en la dirección como codos, válvulas y cualquier cambio en la geometría de las líneas de flujo. Como la turbulencia es difícil de medir y puede causar errores en la mayoría de los instrumentos, se recomienda instalar los instrumentos afectados, considerando tramos de tubería recta antes y después del medidor de flujo.

Como alternativa para instalaciones que no tienen suficiente espacio, el efecto de la turbulencia y otras distorsiones de flujo se pueden minimizar con acondicionadores de flujo.

Para todos los casos, se deben revisar los accesorios usados en la tubería y se deben seguir las recomendaciones de instalación en el manual del instrumento, para garantizar las condiciones mínimas requeridas por el equipo, para poder tener una buena medición.

La medición de flujo también puede sufrir alteraciones causadas por las pulsaciones generadas por bombas o compresores, fluidos de dos fases y cavitación. La cavitación ocurre cuando la presión local es reducida por debajo de la presión de vapor del líquido causando la formación de burbujas. Estas burbujas pueden colapsar causando daño en la tubería y en los medidores resultando lecturas erróneas (ver capítulo 8 - Elementos finales de control).

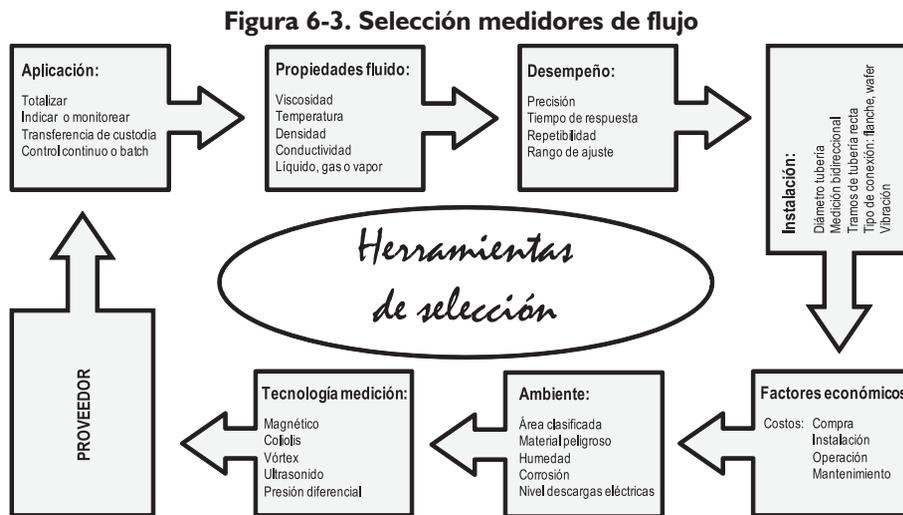
6.3. RESUMEN MEDIDORES DE FLUJO



6.4. SELECCIÓN DE UN MEDIDOR DE FLUJO

Para seleccionar un medidor de flujo, se debe iniciar entendiendo cuál es el objetivo principal de la medición. Normalmente las razones para medir flujo están divididas en cuatro categorías: control, transferencia de custodia, indicación y monitoreo o totalización.

Después de definida la aplicación, se deben revisar cuidadosamente las condiciones del fluido que va a ser medido, requerimientos de desempeño en el proceso, instalación, factores de costo, consideraciones de ambiente y de seguridad.



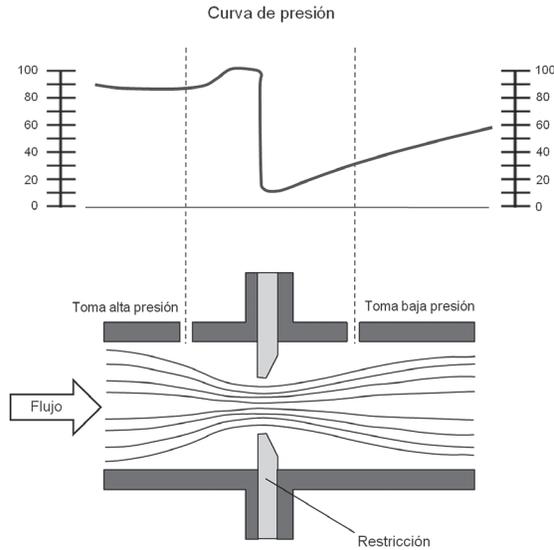
En la figura 6-3, se indican algunos factores de selección importantes, pero pueden existir otros adicionales. Por ejemplo, otras propiedades del fluido pueden afectar la selección del medidor como la composición química, si el fluido es peligroso y puede generar incendio o explosión, abrasividad y contenido de sólidos. Como el proceso de selección es complejo, los fabricantes de instrumentos de flujo normalmente disponen de un software de dimensionamiento, que permite realizar cálculos matemáticos y guían al usuario en la selección de la tecnología y el diámetro del medidor más adecuado.

6.5. MEDIDORES DE FLUJO POR PRESIÓN DIFERENCIAL

Este método se basa en la medición de la diferencia de presión, que existe antes y después de una restricción. El principio de medición está basado en el teorema de Bernoulli.

Cuando una restricción llamada elemento primario es colocada en una tubería que tiene un fluido en movimiento, la velocidad del fluido a través de la restricción se incrementa (energía cinética), causando una caída en la presión estática (energía potencial).

Figura 6-4. Operación medidores de flujo por presión diferencial



La diferencia de presión debido a la restricción (delta P), es igual al cuadrado de la velocidad. Una parte de la ecuación (factor K) es definido por el fabricante y depende del tipo de elemento primario usado, de las características del fluido y otras condiciones del proceso (Ecuación 6-3).

$$Q_v = k\sqrt{\Delta p / \rho}$$

Donde:

Q_v : Flujo volumétrico.

k : Coeficiente de flujo (factor escalización).

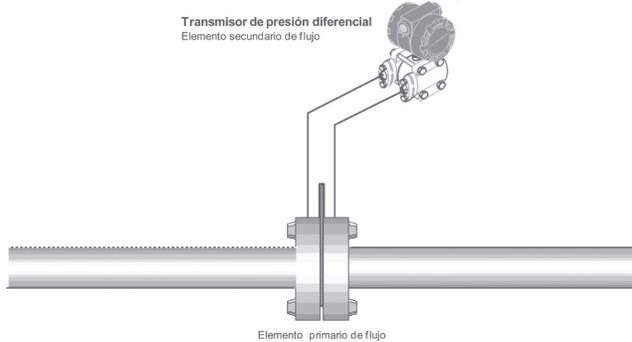
Δp : Presión diferencial.

ρ : Densidad.

Ecuación 6-3. Cálculo flujo volumétrico con medidores de presión diferencial.

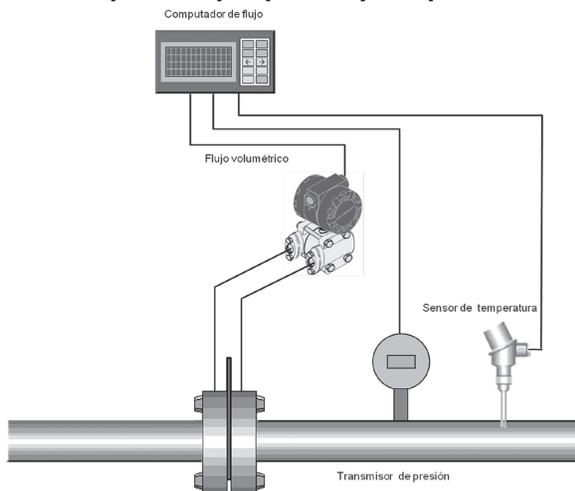
El elemento secundario es el transmisor de presión diferencial, el cual genera una salida proporcional a la presión diferencial y por lo tanto, del flujo. Los instrumentos basados en este método deben estar habilitados para calcular la raíz cuadrada de la presión diferencial medida, para proporcionar una salida lineal debido al flujo.

Figura 6-5. Medición de flujo por presión diferencial



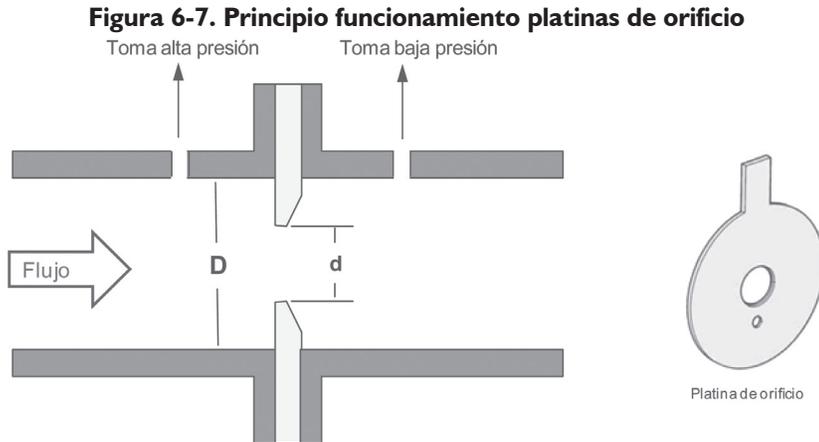
La medición precisa en flujo de gas y vapor requiere compensación aun con pequeños cambios de temperatura. Esa compensación normalmente se hace midiendo el flujo por presión diferencial, la presión estática y la temperatura que entran al sistema de control o por medio de un computador de flujo, donde los valores verdaderos de los coeficientes de descarga, la densidad y los factores de expansión del gas son calculados en una ecuación de flujo.

Figura 6-6. Medición de flujo por presión diferencial, compensado por presión y temperatura



6.5.1. Platinas de orificio

Es una simple pieza de metal de 1/16" a 1/4" de espesor, con un agujero que produce una restricción al flujo cuando se instala en una tubería, normalmente en medio de dos bridas o flanches.



La forma del agujero y su localización pueden variar dependiendo del fluido a ser medido. La más común es la platina concéntrica. Esta produce los mejores resultados, cuando se deben medir flujos turbulentos en líquidos y gases limpios.

Las platinas excéntricas son usadas en tuberías horizontales, cuando se deben medir fluidos con sólidos en suspensión (el orificio debe estar localizado en la parte baja), líquidos con gases no disueltos o gases que contienen condensado (el agujero debe estar localizado en la parte superior).

Las platinas de segmento son recomendadas para medición de lodos, por ser insensibles a los cambios de la relación líquido-sólido y su aceptable precisión.

La platina de filo de cuadrante es usada para medir fluidos viscosos, por su coeficiente constante en un amplio rango del número de Reynolds. Esta puede ser usada con número de Reynolds desde 100.000 hasta 3.000, dependiendo de la relación de diámetros de platina (b).

La platina de orificio actúa como elemento primario, que genera una caída de presión proporcional al flujo que pasa a través de ella.

Figura 6-8. Tipos de platinas de orificio



La relación entre flujo y la presión diferencial, depende principalmente de la relación del diámetro del orificio de la platina y el diámetro interno de la tubería, además de las propiedades físicas del fluido. Esta relación está dada por:

$$Q_v = cA\sqrt{2g\Delta p}$$

Donde:

Q_v : Flujo volumétrico.

c : Coeficiente que tiene en cuenta las propiedades físicas del fluido.

$2g$: Fuerza debido a la gravedad.

Δp : Diferencial de presión.

A : Área del orificio.

Ecuación 6-4. Cálculo flujo volumétrico con platinas de orificio.

Resumen platinas de orificio

Ventajas

- Técnica bien conocida.
- De simple construcción.
- No tiene partes en movimiento.
- Bajo costo inicial.
- Disponibles en diversos diámetros 2" a 40".
- Medición de flujo en altas temperaturas y presiones.
- Aplicable a gases, líquidos y vapor.

Desventajas

- La precisión es afectada por los cambios de presión y densidad.
- Pérdida permanente de presión.
- Alto efecto de la viscosidad.
- Requiere mantenimiento frecuente.

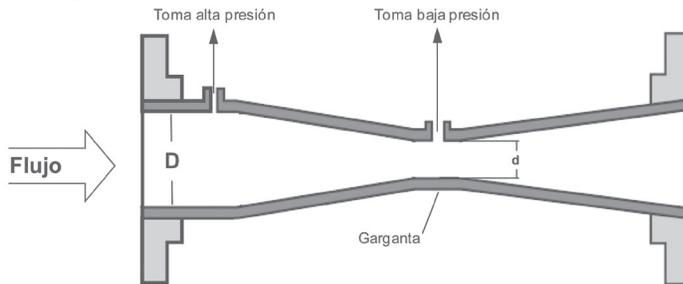
6.5.2. Tubo Venturi

Es una sección de tubo que tiene una disminución de área en su interior. El fluido pasa a través de la restricción, causando un incremento en la velocidad y una diferencia de presión entre la entrada y la salida.

Los tubos Venturi pueden ser usados en tuberías hasta 72" y pueden pasar entre un 25 y 50% más flujo, que una platina de orificio con la misma pérdida de presión. De esta forma, la pérdida de presión no recuperable raramente excede el 10%.

El costo inicial del tubo Venturi es alto, por ello es frecuentemente usado solo en aplicaciones con grandes flujos o aplicaciones con mediciones difíciles.

Figura 6-9. Principio funcionamiento tubo Venturi



Los tubos Venturi son insensibles a los efectos del perfil de velocidad y requieren menos tramos rectos aguas arriba y abajo que la platina de orificio.

Su forma natural combinada con la acción de autolimpieza del fluido a través del tubo, lo hace inmune a la corrosión, erosión y empastamiento de las paredes internas.

En comparación con su alto costo inicial, el costo total de funcionamiento puede ser favorable, porque permite ahorrar costos en instalación, operación y mantenimiento.

Resumen tubos Venturi

Ventajas

- Pequeñas pérdidas de presión.
- Opera en condiciones extremas de temperatura y presión.
- No tiene partes en movimiento.

Desventajas

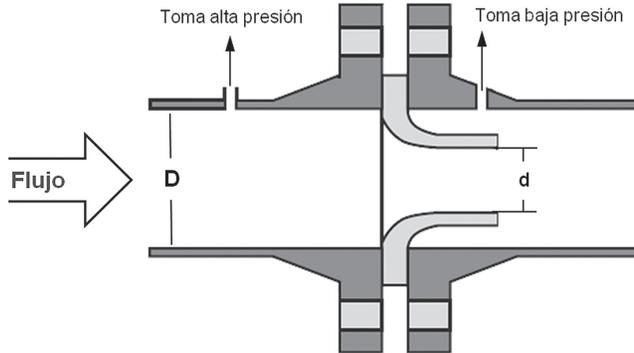
- Alto efecto de la viscosidad.
- Cálculos complejos para la fabricación.
- Calibración dispendiosa.

6.5.3. Toberas o boquillas de flujo

Elementos de flujo usados en tuberías desde 2" hasta 20" y relación de diámetros $b = 0.2$ a 0.64 . La boquilla de flujo es más estable que las platinas de orificio, particularmente en fluidos con altas temperaturas y velocidades.

Es frecuentemente usada para medir grandes ratas de flujo de vapor sobrecalentado.

Figura 6-10. Principio funcionamiento boquillas de flujo



Las boquillas de flujo al igual que el tubo Venturi, tienen mayor capacidad de flujo que la platina de orificio y requiere una inversión inicial menor que los tubos Venturi, pero tienen menor recuperación de presión.

No son recomendadas para medición de flujo de lodos y fluidos muy sucios.

Las boquillas de flujo están disponibles para números Reynolds tan bajos como 5.000, pero se recomienda que sean usadas cuando el número de Reynolds sea mayor a 50.000.

Las boquillas de flujo mantienen su precisión por largos periodos de tiempo, aun en aplicaciones difíciles. Pueden ser usadas para medir flujo de gas con alta precisión. Por ello son frecuentemente usadas como patrones de laboratorio, para calibrar otros medidores de flujo.

Pueden ser instaladas en cualquier posición, pero el montaje horizontal es el preferido. El montaje vertical con flujo descendente es ideal para vapor húmedo, gases o líquidos con sólidos en suspensión.

Se debe tener especial cuidado para montarla centrada con respecto a la tubería, porque se pueden producir errores adicionales en la medición.

Resumen boquillas de flujo

Ventajas

- Grandes caudales y altas presiones.
- Fluidos con altas velocidades.
- Alta capacidad de medición.
- Precisos.

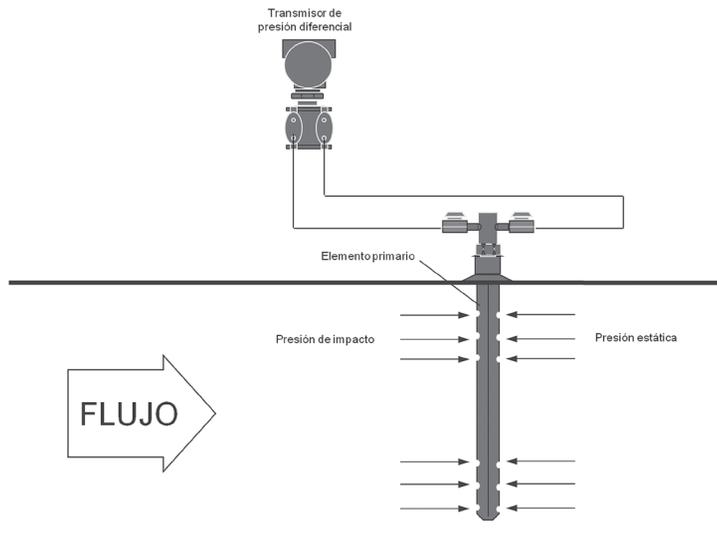
Desventajas

- Costo elevado.
- Difícil inspección.
- Mediana pérdida de presión

6.5.4. Tubo Pitot

Es uno de los sensores de flujo más simples, usados en aplicaciones industriales para medir flujo de aire en ductos, tuberías y para medición de flujo en líquidos limpios instalados en tuberías.

Figura 6-11. Principio funcionamiento tubos Pitot promedio



Un tubo Pitot mide dos presiones: la presión estática y la presión de impacto.

La presión estática es la presión de operación en la tubería, localizada aguas arriba del tubo Pitot. La presión estática es medida en ángulo recto a la dirección del flujo, preferiblemente en sitios de baja turbulencia.

La presión total de impacto es la suma de la presión estática y cinética y para medir la presión de impacto, muchos tubos Pitot usan un pequeño tubo en L, enfrentado a las líneas de flujo. La velocidad del fluido es calculada por la siguiente ecuación.

$$V = \frac{k\sqrt{\Delta P}}{\rho}$$

Donde:

V : Velocidad del fluido.

K : Constante.

ΔP : Diferencia presión impacto-presión estática.

ρ : Densidad.

Ecuación 6-5. Cálculo velocidad del fluido en un tubo Pitot.

La rata de flujo es calculada multiplicando la velocidad del fluido, por el área de la tubería o ducto. Esto es crítico porque la medición de velocidad depende de la longitud de inmersión del tubo Pitot y de la condición de flujo. Cuando la velocidad del fluido se incrementa, se pasa de un perfil de flujo parabólico (flujo laminar) a uno plano (flujo turbulento). Esto produce cambios en la velocidad promedio y se requiere un ajuste en la longitud de inmersión. Por eso el tubo Pitot es recomendado solo para flujos turbulentos, con número de Reynolds mayor a 20.000 y bajo estas condiciones el perfil de flujo tiende a una forma plana. De esta forma, no es crítica la longitud de inmersión del sensor.

Para solucionar el problema de encontrar el punto de velocidad promedio, en la actualidad se usan tubos Pitot promedio.

Un tubo Pitot promedio tiene múltiples puertos para la medición de la presión estática y la presión de impacto. El número de puertos, la distancia y el diámetro pueden ser modificados para cada aplicación en particular. Los tubos Pitot promedio ofrecen algunas ventajas con relación a los tubos Pitot de un solo puerto. Ellos son un poco más costosos que los tubos Pitot convencionales, pero son más precisos especialmente en fluidos con perfiles de flujo no definidos.

Los tubos Pitot son usados en la medición de flujo de gas o líquidos limpios, debido a que las partículas podrían tapar los puertos de medición.

Resumen tubo Pitot

Ventajas

Económicos.

Fácil instalación.

Pequeñas pérdidas de presión.

Alta capacidad de medición.

Desventajas

Limitados en tuberías pequeñas.

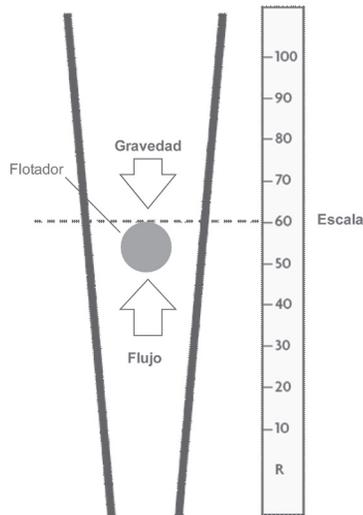
No recomendable su uso con fluidos sucios.

6.6. ROTÁMETRO

Los rotámetros o medidores de área variable son instrumentos para medición de flujo, su principio de funcionamiento es simple, son precisos y económicos.

Este tipo de medidor consiste en un tubo cónico de vidrio o plástico, montado verticalmente en la línea de flujo, con el diámetro mayor localizado en la parte superior. Dentro del tubo se encuentra un flotador, el cual está libre para desplazarse hacia arriba y hacia abajo. El fluido entra por la parte baja, pasa a través del rotámetro y sale por la parte alta del tubo de vidrio. El flotador se eleva o cae, dependiendo de la rata de flujo. La fuerza hidráulica ascendente que actúa sobre el flotador está balanceada por el peso del flotador y la altura de equilibrio indica el valor actual de flujo, comparándose con la escala impresa sobre el cuerpo del rotámetro.

Figura 6-12. Principio funcionamiento rotámetro

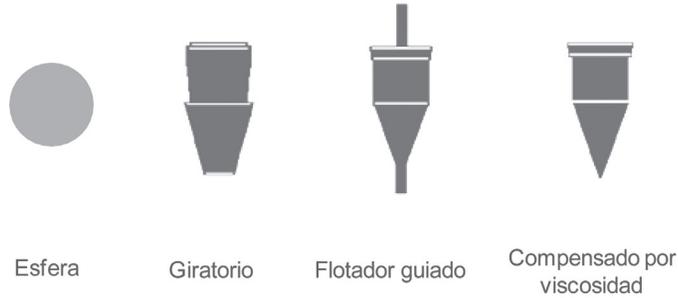


6.6.1. Tipos de flotadores

La forma del flotador determina el efecto del cambio de viscosidad sobre la precisión del medidor.

El flotador más simple, es el flotador de esfera. La esfera se usa principalmente para bajas ratas de flujo, donde se presentan pequeñas variaciones de viscosidad.

Figura 6-13. Tipos de flotadores



Los flotadores de esfera son comúnmente fabricados de acero inoxidable, vidrio, tantalio, monel, níquel, Hastelloy C, latón y plásticos como propileno y PVC. Seleccionando el material del flotador, un tubo de medición estándar puede ser adaptado a un rango de flujo determinado.

Para aplicaciones que requieren alta precisión, los flotadores aerodinámicos son la opción más económica. Debido a su forma, este flotador provee alta capacidad de flujo.

El flotador aerodinámico sin embargo, no posee compensación para cambios de viscosidad del fluido, por ello solo pueden ser usados cuando se esperan mínimas variaciones de viscosidad.

Frecuentemente un rotámetro es usado para medición de flujo con fluidos que presentan variaciones grandes de viscosidad. Para este tipo de servicio, el flotador compensado de viscosidad provee la máxima inmunidad a los cambios de viscosidad.

Resumen rotámetros

Ventajas

- Lectura directa.
- Simple operación.
- Puede usarse en todo tipo de fluidos.
- Pérdida baja de presión.
- Medición de flujo con altas presiones y caudales bajos.
- Costo bajo.

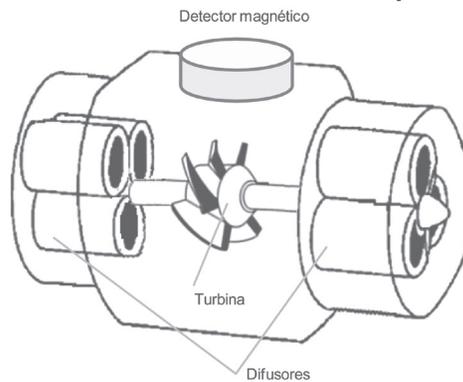
Desventajas

- Requiere mantenimiento periódico.
- Fallas mecánicas por fluidos con contenidos de sólidos.
- Depende de las características del fluido, como densidad, viscosidad y temperatura.
- Debe ser montado verticalmente.
- Precisión limitada.

6.7. TURBINA

El medidor de turbina está conformado por un rotor de múltiples aletas, montado perpendicular a la dirección de flujo. Bajo condiciones constantes, la velocidad de rotación de la turbina, es proporcional a la velocidad del fluido. La velocidad de rotación es función directa de la rata de flujo, que es sensada y convertida en una señal de volumen o flujo, por un detector inductivo o magnético. Los pulsos eléctricos son contados y totalizados en una unidad electrónica externa.

Figura 6-14. Partes de un medidor tipo turbina



El flujo volumétrico es calculado mediante la siguiente ecuación:

$$Q_v = 2\pi \times r \times A \times n \times \cot \alpha$$

Donde:

Q_v : Flujo volumétrico.

r : Radio promedio de la turbina.

A : Área libre en el tubo de medición.

α : Ángulo entre el eje axial y turbina.

n : Número de revoluciones.

Ecuación 6-6. Cálculo flujo volumétrico en medidores tipo turbina.

En el interior del medidor aguas arriba y aguas abajo, se encuentran instaladas estructuras aerodinámicas llamadas difusores o estatores para acondicionar el fluido.

El flujo a través de las aletas del rotor pasa inclinado a un ángulo apropiado, para que incida sobre la turbina y experimente un torque, que produzca movimiento en el rotor. La rata de rotación (que puede ser de varias decenas, a miles de rpm) es detectada cada vez que pasa una aleta del rotor sobre el punto donde está localizado el detector. Esto significa que se ha completado un valor de volumen fijo del fluido.

Las turbinas axiales tienen su mejor desempeño cuando se usan en condiciones limpias, flujos estables de gases y líquidos con baja viscosidad (10cSt hasta 100cSt). Bajo estas condiciones de estabilidad mecánica, proveen una excelente repetibilidad.

La precisión de los medidores de turbina puede ser reducida en condiciones de flujos no acondicionados o con turbulencia. La instalación debe proveer acondicionadores de flujo a lo largo de la longitud del tubo, a longitudes específicas de tramos rectos, aguas arriba del medidor.

Otras fuentes de error son las pulsaciones, que se presentan principalmente en aplicaciones de gas, pero aún no hay técnica adecuada para contrarrestarlas. El mantenimiento periódico, las pruebas y recalibración son requeridas, porque la calibración puede tener corrimiento debido al ensuciamiento, daño mecánico o contaminación.

Para ciertas aplicaciones, especialmente en transferencia de custodia de líquidos como crudo y en mediciones de gas natural, los estándares internacionales y otras recomendaciones de fabricantes, especifican los mínimos requisitos que deben cumplir los medidores tipo turbina.

Resumen turbinas

Ventajas
Alta precisión, para viscosidad y rango definidos.
Medición en líquidos con condiciones de bajas y altas temperaturas y altas presiones
Medición de flujo en líquidos no conductivos.

Desventajas
La viscosidad del líquido debe ser conocida.
Problemas de medición, en líquidos de dos fases.
Limitado su uso en fluidos con sólidos en suspensión.

6.8. DESPLAZAMIENTO POSITIVO

Su principio de funcionamiento se basa en la división y conteo de volúmenes conocidos de líquido o gas, mientras pasan a través del medidor. La rata de flujo se calcula contando el número de divisiones del fluido, multiplicado por el volumen de cada división.

Los medidores de desplazamiento positivo, pueden expresar el flujo total que ha pasado en un totalizador o generando pulsos, que representan un volumen discreto de fluido.

Estos medidores son usados para dosificación de hidrocarburos, mezcla de productos y operaciones de transferencia de custodia. Son medidores muy precisos y tienen buena repetibilidad.

Los medidores de desplazamiento positivo no requieren alimentación para su operación, ni tramos de tubería recta aguas arriba y aguas abajo para su instalación. Pueden ser usados en tuberías desde 1/4" hasta 12". Su rango de ajuste puede ser tan alto como 100:1.

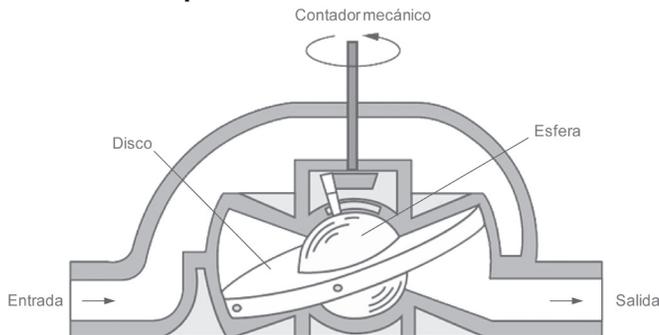
El fluido medido debe ser limpio y las partículas mayores a 100 micrones, deben ser filtradas. Por esta razón no se recomienda para medición de lodos y fluidos abrasivos.

Para el caso de fluidos limpios, su precisión y amplio rango de ajuste, los hace ideales para transferencia de custodia y control por lotes en aplicaciones industriales.

6.8.1. Medidor de disco

Estos son los medidores de desplazamiento positivo más comunes. Son usados para medición del consumo de agua, en la mayoría de los hogares de todo el mundo. Cuando el agua fluye a través de la cámara de medición, el disco se balancea girando un eje, que hace rotar un imán. Este imán es acoplado a un contador mecánico o a un transmisor de pulsos.

Figura 6-15. Principio funcionamiento medidor disco oscilante



Como el cuerpo del medidor debe ser no magnético, normalmente son construidos de bronce, aluminio y plástico. Están disponibles desde 5/8" hasta 2", con presiones hasta 150 psig y temperaturas hasta 120°C.

6.8.2. Medidor de engranajes

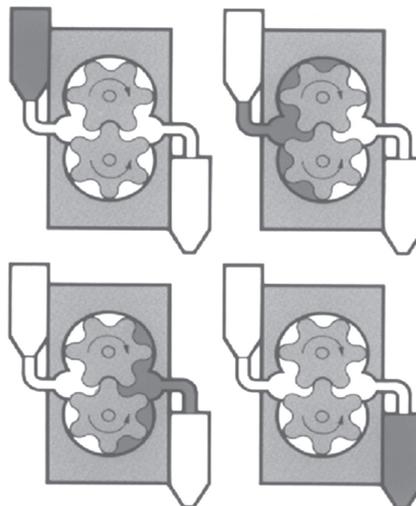
El flujo de líquido es dividido en cantidades con volumen constante, entre los dientes de los engranajes y el cuerpo del medidor. La presión del líquido llena continuamente las cavidades y hace que los engranajes roten con el líquido, desde la entrada hacia la salida. La rotación de los engranajes es sensada instalando un sensor de efecto *hall*, montado externamente sobre uno de los engranajes.

Estos medidores tienen una precisión de 0,5% de la rata, si la viscosidad del proceso es alta y constante.

Pueden fabricarse en una gran variedad de metales, incluyendo acero inoxidable y plásticos resistentes a la corrosión como PVDF.

Este tipo de equipos son usados para medición de flujo de pintura, pero también pueden estar disponibles en diseños para aplicaciones sanitarias con aprobación 3ª, para medición de flujo de leche, jugos y chocolate. Estos medidores están disponibles desde 1/10" hasta 6" y pueden manejar presiones tan altas como 3.000 psig y temperaturas hasta 200°C.

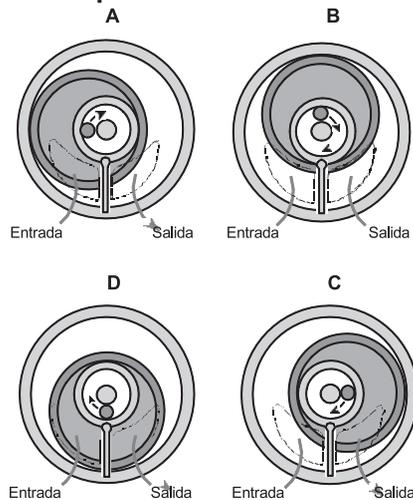
Figura 6-16. Principio funcionamiento medidor de engranajes



6.8.3. Medidor de pistón

La cámara de medición es cilíndrica, con una placa de partición separando la entrada y la salida. El pistón también es cilíndrico y está perforado en ambos lados, con varios orificios para permitir el libre paso del fluido. Este pistón es guiado por un rodillo dentro de la cámara de medición y su movimiento es transferido a un imán que está instalado en la parte externa a la cámara. El imán puede ser usado para impulsar un contador o como entrada de señal a un transmisor.

Figura 6-17. Principio funcionamiento medidor de pistón

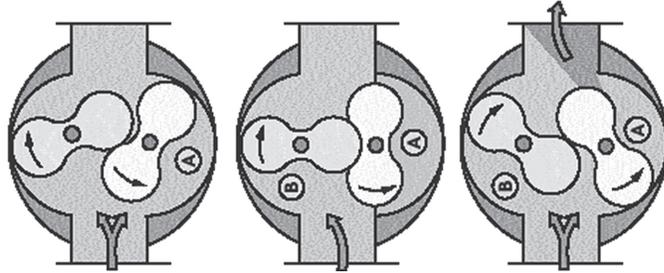


Típicamente son usados con fluidos viscosos, como aceite en pruebas de motor donde el rango de ajuste no es crítico. También puede ser usado para medición de agua en aplicaciones residenciales, donde pueden pasar cantidades limitadas de sólidos y arena.

6.8.4. Medidor de lóbulos

En el medidor de lóbulos, dos rotores giran en sentido opuesto dentro de una carcasa ovalada. Los lóbulos rotan cuando un volumen fijo de líquido ingresa y es transportado hacia la salida. Como los lóbulos mantienen una posición relativamente fija, solo es necesario medir la velocidad de rotación de uno de ellos. El rotor es dentado para generar pulsos o para acoplar magnéticamente a un transmisor.

Figura 6-18. Principio funcionamiento medidor de lóbulos



Los medidores de lóbulos pueden ser construidos, desde 22" hasta 24". La capacidad de flujo puede ir desde 8 gpm hasta 18.000 gpm. Poseen buena repetibilidad con ratas de flujo grandes y pueden usarse con presiones tan altas como 1.200 psig y temperaturas hasta 200°C. Pueden ser construidos en diferentes materiales, como termoplásticos y en metales resistentes a la corrosión.

6.8.5. Medidor helicoidal

Usa dos engranajes helicoidales que atrapan el fluido del proceso. La fuerza del fluido hace rotar los engranajes, en forma longitudinal a la tubería. Sensores ópticos o magnéticos son usados para generar un tren de pulsos proporcional a la velocidad. La fuerza necesaria para hacer rotar los engranajes, es relativamente pequeña y por ello la pérdida de presión es relativamente baja comparada con otros medidores de desplazamiento positivo. La mejor precisión obtenida en estos medidores, típicamente es de $\pm 0,2\%$ de la rata de flujo.

Los medidores de engranajes helicoidales pueden medir fluidos con un rango de viscosidad alto, haciéndolo un medidor ideal para fluidos como pegantes y polímeros muy viscosos. Como la caída de presión a flujo máximo no puede exceder 30 psid, la máxima rata de flujo de este medidor se reduce cuando la viscosidad incrementa.

Cuando el fluido tiene buenas características de lubricación, el rango de ajuste puede ser hasta 100:1, pero lo normal es encontrar este tipo de medidores en aplicaciones con rango de ajuste de 10:1.

Resumen medidores desplazamiento positivo

Ventajas

Manejo crudos pesados.

Fluidos viscosos, agua, ácidos, sodas.

Buena repetibilidad.

Alta precisión.

Desventajas

Pérdida alta de presión.

Bajos flujos.

Desgaste de partes en movimiento.

Costo inicial alto.

Costos elevados de mantenimiento.

6.9. MEDIDORES ULTRASÓNICOS

Para poder realizar la medición con esta tecnología se emplean ondas de sonido que se transfieren al interior del medio, para determinar la rata de flujo. Los pulsos generados por un transductor piezoeléctrico viajan a la velocidad del sonido, a través de un fluido en movimiento. Dependiendo del diseño, los sensores pueden estar de contacto con el fluido o externos para acoplar la energía ultrasónica dentro de la tubería.

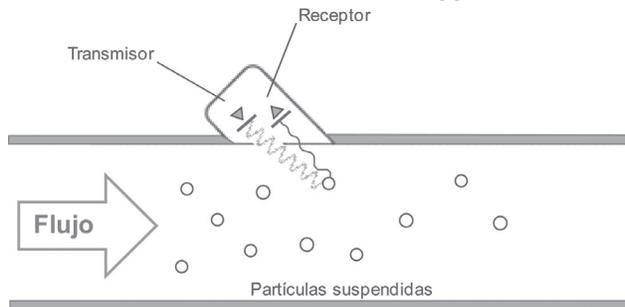
La velocidad de propagación del sonido en el medio, depende del fluido que está siendo medido y de la temperatura del medio.

En la actualidad existen dos métodos para medición de flujo por ultrasonido: efecto Doppler y tiempo de tránsito.

6.9.1. Medidor de efecto Doppler

Una onda de sonido de frecuencia constante, es transmitida al medio y reflejada al transmisor, por las partículas o burbujas que viajan con el fluido. Como las partículas están en movimiento, la frecuencia de las ondas de sonido reflejadas, difiere de la frecuencia original, en función de la velocidad de las partículas.

Figura 6-19. Principio funcionamiento medidor ultrasonido de efecto Doppler



La velocidad del fluido en los medidores de efecto Doppler puede ser determinada por la ecuación 6-7.

$$V = \frac{(f_o - f_i)Ct}{2f_o \cdot \cos \varphi}$$

Donde:

V : Velocidad del fluido.

f_o : Frecuencia de transmisión.

f_i : Frecuencia reflejada.

Ct : Velocidad del fluido dentro del transductor.

φ : Ángulo entre emisor y receptor, con respecto al eje de la tubería.

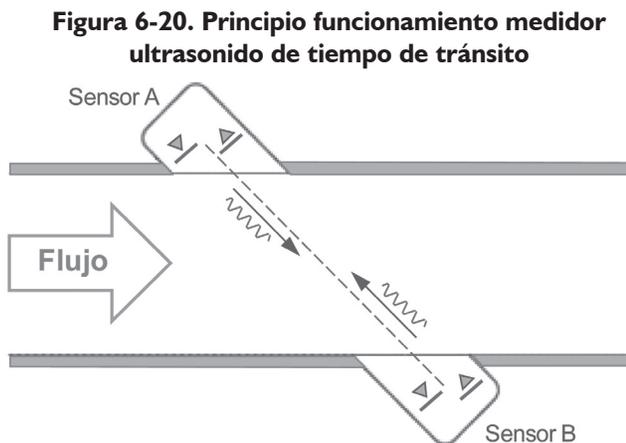
Ecuación 6-7. Cálculo velocidad medidor ultrasónico de efecto Doppler.

Los medidores de efecto Doppler son usados para medir flujo en fluidos con presencia de burbujas y sólidos en suspensión. Si la cantidad de sólidos en suspensión es muy alta (más de 45%) o presentan mucho aire o gas (especialmente burbujas muy finas), el medidor no podrá distinguir entre la frecuencia reflejada y el ruido del entorno de la tubería.

De igual forma, en aplicaciones de fluido con velocidades muy bajas, los medidores de efecto Doppler no son prácticos.

6.9.2. Medidor de tiempo de tránsito

Para poder realizar la medición por tiempo de tránsito, es necesario disponer de dos sensores, uno instalado aguas arriba y otro aguas debajo desde el de medición, tomado como referencia. Cada transductor envía una onda de sonido al otro y la diferencia de tiempo entre la recepción de las dos señales, indica la velocidad del fluido, que es proporcional a la rata de flujo.



Cuando no hay flujo sobre la tubería, el tiempo requerido por la señal enviada desde el sensor A hasta el sensor B, es el mismo que toma la señal para ser transmitida desde el sensor B hasta el sensor A.

Cuando se presenta flujo, se incrementa el tiempo requerido por la señal desde el sensor B hasta el sensor A, por estar viajando en sentido contrario a la corriente. De forma contraria, el tiempo requerido por la señal del sensor A hasta el sensor B decrece, porque está viajando en sentido de la dirección de flujo. La velocidad del fluido puede ser determinada por la ecuación 6-8.

$$V = K \frac{t_1 - t_2}{t_1 \times t_2}$$

Donde:

V : Velocidad promedio del fluido.

K : Factor proporcional de flujo.

t_1 : Tiempo de tránsito en sentido de la corriente.

t_2 : Tiempo de tránsito en sentido contrario de la corriente.

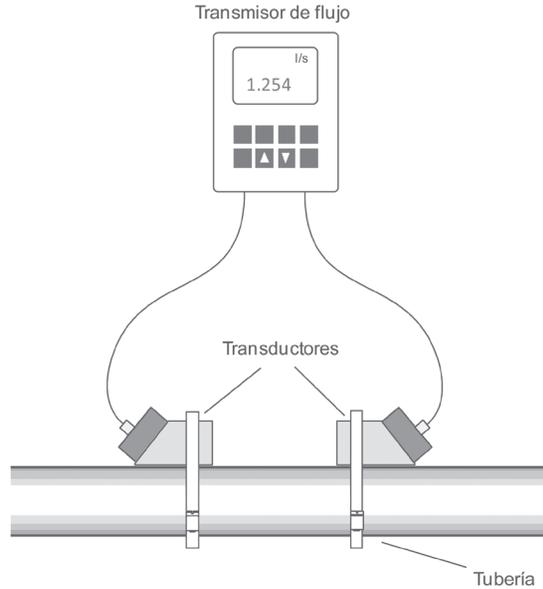
Ecuación 6-8. Cálculo velocidad medidor ultrasónico de tiempo de tránsito.

Aunque el medidor de flujo ultrasónico por tiempo de tránsito puede trabajar con muchos fluidos, se debe tener en cuenta que sean líquidos limpios y homogéneos, con bajos contenidos de gas y sólidos. Puede trabajar con líquidos calientes o fríos y también puede trabajar en condiciones de bajos flujos. Los sensores en contacto pueden ser usados en tuberías desde 1/2”.

Como alternativa para instalaciones donde no se tiene posibilidad de adecuar la tubería para instalar los sensores, se disponen de medidores ultrasónicos con tecnología Clamp On. Esta tecnología permite la medición de flujo, sin contacto directo con el medio y con la facilidad de realizar la instalación sin interrupción del proceso.

Para que esta tecnología funcione de manera satisfactoria, se debe verificar que la tubería donde se va a realizar la instalación tenga propiedad de transferir el sonido. La mayoría de los metales, materiales como PVC, polipropileno, concreto, entre otros, tienen esta propiedad. Sin embargo, se debe tener especial cuidado, en tuberías con recubrimiento interno, con posibilidad de que el producto forme incrustaciones en el interior del tubo o tubos con refuerzo en hierro porque pueden atenuar la señal de ultrasonido.

Figura 6-21. Medición de flujo con ultrasonido tipo Clamp On



Resumen medidores ultrasónicos

Ventajas

- Modelos para instalación sin interrupción de proceso.
- No hay pérdidas de presión.
- No hay obstrucción de flujo.
- Usado en tuberías de grandes diámetros.

Desventajas

- La precisión depende del perfil de flujo y de la instalación.
- La adherencia en el tubo, puede generar errores en la medición.
- Costo elevado.

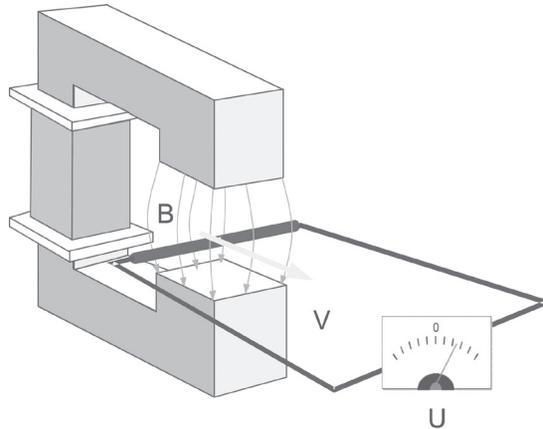
6.10. MEDIDORES MAGNÉTICOS

El funcionamiento de los medidores de flujo electromagnético, se basa en la ley de inducción de Faraday. La ley establece que el voltaje inducido a través de un conductor que se mueve en ángulo recto, a través de un campo magnético, es proporcional a la velocidad con la que se mueve el conductor.

Basado en este principio, en el interior del medidor de flujo se genera un campo magnético, de forma perpendicular a las líneas de flujo y la medida de la tensión es función de la velocidad, con la cual pasa el líquido por el tubo de medición. Esta tensión es medida directamente por dos electrodos, que se encuentran en contacto con el medio.

En un medidor magnético, el líquido que fluye a través del sensor, representa el conductor en movimiento, en medio del campo magnético.

Figura 6-22. Principio funcionamiento medidor magnético



El voltaje medido es proporcional a la velocidad promedio del fluido (Ecuación 6-9).

$$U = B \times L \times V$$

Donde:

U : Voltaje inducido.

B : Intensidad de campo magnético.

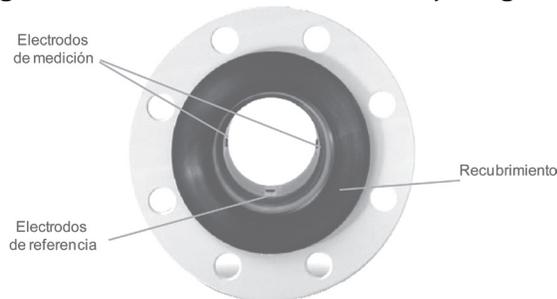
L : Distancia entre electrodos.

V : Velocidad del fluido.

Ecuación 6-9. Voltaje inducido en medidores magnéticos.

El sensor de flujo se construye con un tubo de material no ferroso, recubierto por un material aislante y un par de electrodos que penetran el tubo y el aislante. El tubo de medición está construido normalmente en acero al carbono o acero inoxidable, con bridas o flanches fabricados bajo normas ANSI¹ o DIN², JIS³, BSI⁴, etc.

Figura 6-23. Partes de un sensor de flujo magnético



Los materiales usados como recubrimiento, dependen de la temperatura y la compatibilidad química del líquido a ser medido. Estos pueden ser fabricados en caucho suave, caucho duro, poliuretano, teflón, cerámica, entre otros. De igual forma el material de los electrodos, debe ser seleccionado para ser resistente a la corrosión. Ellos pueden ser fabricados en acero inoxidable, Hastelloy, tantalio, titanio y platino.

Los medidores magnéticos son de tipo no invasivo y pueden ser usados en medición de líquidos corrosivos, químicos y lodos. En este medidor no hay obstrucciones que puedan generar caída de presión y no hay partes en movimiento, que tengan que limpiarse o cambiarse. Son insensibles a los cambios de viscosidad, densidad o presión y el voltaje generado es una representación precisa de la velocidad promedio.

Al igual que todos los medidores de velocidad, para una operación adecuada la tubería debe permanecer completamente llena, con el líquido a ser medido. Si no se garantiza la condición de tubería totalmente llena, se pueden

-
1. American National Standards Institute.
 2. Deutsches Institut für Normung.
 3. Japanese Industrial Standards.
 4. British Standards Institution.

generar errores significativos y aleatorios en la medición. Por ello se prefiere su montaje en tuberías verticales con flujo ascendente, o tubería horizontal con pendiente positiva, para evitar la condición de tubería parcialmente llena.

Para poder usar el medidor magnético se requiere una conductividad mínima 20 mS/cm, pero existen versiones especiales de sensores, que permiten medición con líquidos que tengan valores desde 1 mS/cm.

Resumen medidores magnéticos

Ventajas

- La medición no es afectada por las propiedades del fluido.
- No tiene partes en movimiento.
- No hay reducción del diámetro.
- Ideal para líquidos contaminados y sólidos en suspensión.

Desventajas

- Solo puede ser usado en líquidos conductivos.

6.11. VORTEX

Su funcionamiento se basa en el fenómeno de generación de vórtices, llamado *Karman vortex street*. Cuando un fluido pasa por un cuerpo no aerodinámico, este se separa y genera torbellinos o vórtices, que se alternan a cada lado de un obstáculo.

Los vórtices que se generan tienen dos características principales: se generan de forma alternada, primero a un lado y luego en el opuesto del obstáculo y la frecuencia con la que se generan, es proporcional a la velocidad del fluido (Ecuación 6-10).

$$v = \frac{f \times d}{St}$$

Donde:

v : Velocidad del fluido.

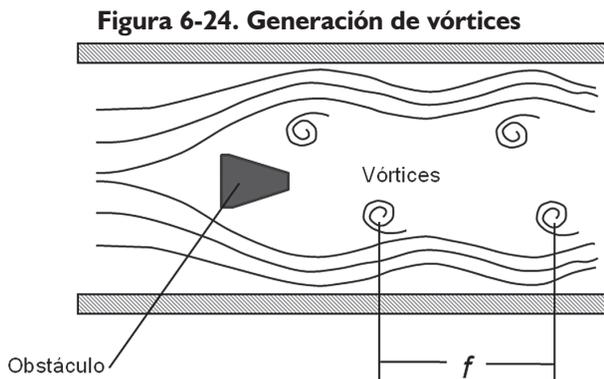
f : Frecuencia de vórtices.

d : Ancho obstáculo.

St : Número de Sthouhal.

Ecuación 6-10. Cálculo velocidad del fluido en medidores tipo Vortex.

Los vórtices, causan áreas de fluctuación de presión. La parte externa del vórtice se comporta como área de baja presión, mientras la parte interna es de alta presión. Los impulsos de presión en el área interna del vórtice son detectados por el sensor.



La frecuencia de los vórtices no es afectada por los cambios de presión, temperatura, conductividad, densidad o viscosidad del fluido.

Un medidor Vortex normalmente es fabricado con materiales como acero inoxidable o Hastelloy.

Están disponibles en diámetros desde 1/2" hasta 12". Los cuerpos donde se generan los vórtices (cuerpo no aerodinámico), pueden tener diferentes formas: cuadrado, rectángulo, en "T", trapezoidal, entre otras, pero el que se utiliza con mayor frecuencia es el de forma de delta.

En la actualidad, la mayoría de los medidores Vortex, usan sensores piezoeléctricos o capacitivos para detectar las oscilaciones de presión alrededor de la obstrucción. Estos sensores responden a los cambios de presión, con una pequeña señal de voltaje que tiene la misma frecuencia que los vórtices generados.

El medidor Vortex puede ser usado para medición de líquidos (especialmente no conductivos), gases y vapor. No son recomendados para procesos por lotes, aplicaciones de flujo intermitente o flujo de gases a baja presión.

Resumen medidores Vortex

Ventajas

- Bajo costo instalación.
- Alta precisión.
- Aplicable en gases, líquidos y vapor.
- Baja pérdida de presión.

Desventajas

- Sensible a la viscosidad con $Re < 20000$.
- Costo elevado.
- Sensible a la vibración.

6.12. MEDIDOR TIPO CORIOLIS

Los medidores másicos operan aplicando la segunda ley de Newton, la cual establece que la fuerza es igual a la masa multiplicada por la aceleración (Ecuación 6-11).

$$F = m \times a$$

Donde:

F : Fuerza

m : Masa

a : Aceleración

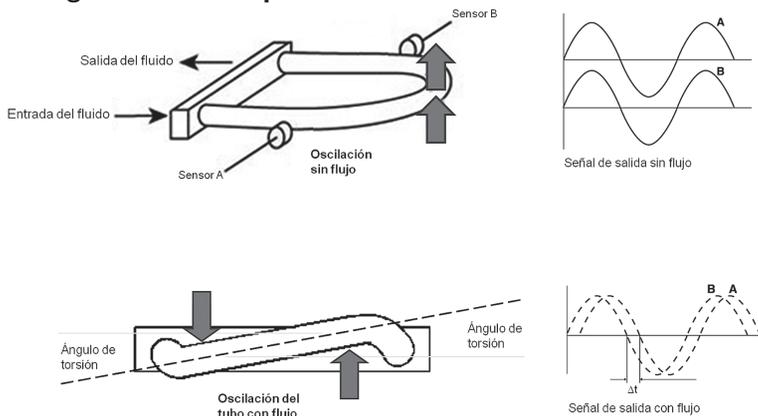
Ecuación 6-11. Cálculo flujo másico medidor Coriolis.

La fuerza Coriolis está siempre presente en el interior del medidor, cuando los movimientos de translación y rotación ocurren simultáneamente.

El movimiento de translación se genera cuando el fluido es impulsado en el interior de los tubos de medición, por el empuje de una bomba o compresor. El movimiento de rotación en los medidores Coriolis, es inducido haciendo vibrar los tubos de medición a una frecuencia de resonancia.

Cuando no hay flujo, solo está presente el efecto de rotación. Los tubos oscilan a su frecuencia natural (parte superior, figura 6-25). Con esta condición, la señal de salida de los sensores ubicados a la entrada (sensor A) y salida (sensor B), se encuentra en fase.

Figura 6-25. Principio funcionamiento medidores Coriolis



Cuando se hace pasar fluido en el interior del medidor, el efecto de rotación (oscilación de los tubos) comienza a interactuar con el de translación (fluido pasando por los tubos de medición), generando torsión de los tubos y una vibración no homogénea. El efecto de torsión sobre los tubos, es medido por detectores magnéticos localizados en cada lado del tubo, que entregan una señal eléctrica en función de la velocidad de vibración.

Si comparamos la señal de los dos sensores cuando está circulando flujo, se encuentra una diferencia de fase entre la señal del sensor en la entrada y la señal del sensor a la salida.

El flujo másico es determinado midiendo la diferencia de tiempo, entre la señal de los dos detectores, que es directamente proporcional al flujo másico.

De acuerdo a la segunda ley de movimiento de Newton, la cantidad de torsión del sensor de flujo, es directamente proporcional a la rata de flujo másico que pasa a través del medidor.

6.12.1. Medición de densidad

El sensor Coriolis vibra a su frecuencia de resonancia, usando un electroimán y un circuito de alimentación. La frecuencia de resonancia del tubo es función de su geometría, el material y la masa del tubo. La masa del medidor está compuesta por dos partes: la masa del tubo y la masa del fluido dentro del tubo. Como la masa del tubo es constante para cada tipo de sensor, entonces la masa del fluido dentro del tubo es igual a la densidad multiplicada por el volumen del tubo. Como el volumen del tubo es constante, la frecuencia de oscilación del tubo puede ser relacionada a la densidad del fluido. De esta forma, la densidad puede ser determinada midiendo la frecuencia de resonancia del sensor.

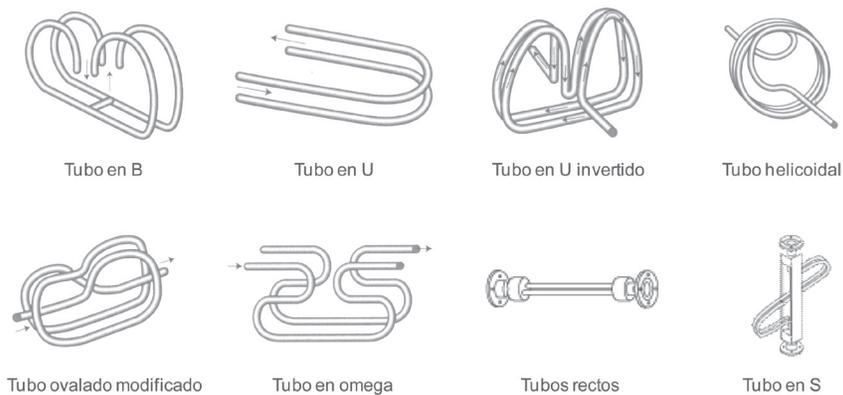
Usando la misma bobina de excitación del tubo y un sistema magnético de detección, una señal eléctrica representa la frecuencia de vibración del sensor. Un sensor de temperatura compensa los cambios del módulo de elasticidad en el tubo debido a los cambios de temperatura.

6.12.2. Tubos de medición

A diferencia de otros equipos de medición como transmisores de presión diferencial que son muy semejantes independientemente del fabricante, los

medidores Coriolis no tienen una forma semejante, porque desde los primeros equipos lanzados al mercado, cada fabricante ha buscado diferentes formas de tubo para poder medir con mayor facilidad el efecto de torsión. La tendencia actual de la mayoría de los fabricantes es usar un solo tubo de medición recto o lo más recto posible para reducir el tamaño y evitar pérdidas significativas de presión. A continuación se podrán ver algunos ejemplos de tubos de medición usados en medidores tipo Coriolis:

Figura 6-26. Formas de tubos de medición en medidores Coriolis



Resumen medidores Coriolis

Ventajas

- Medición directa de flujo, sin compensación de presión y temperatura.
- Medición independiente de las características del líquido.
- Medición de flujo másico, temperatura y densidad.
- No es afectado por la viscosidad.

Desventajas

- Precio elevado.
- Sensible a la vibración.

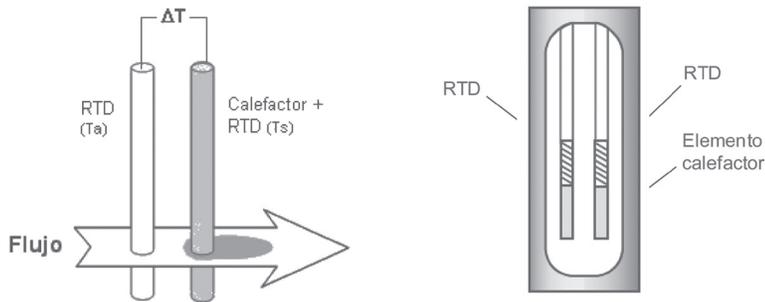
6.13. MEDIDOR DISPERSIÓN TÉRMICA

El principio del medidor de flujo por dispersión térmica, se basa en el efecto de enfriamiento de las moléculas de un gas, que están circulando por la tubería.

Cuando una corriente de gas pasa en medio de una superficie caliente, cada molécula de gas que pasa, remueve parte de esa energía térmica generando un efecto de enfriamiento.

El efecto de pérdida de calor es proporcional a la rata de flujo másico, porque los cambios en la temperatura de gas, su presión y la velocidad, inmediatamente alteran el número de moléculas que pasan sobre la superficie.

Figura 6-27. Principio funcionamiento medidor dispersión térmica



El medidor está conformado por dos electrodos. El primero tiene en su interior un elemento calefactor y un sensor de temperatura por resistencia que monitorea la temperatura generada por el calefactor. El segundo electrodo, solo tiene en su interior un sensor de temperatura.

El circuito de medición está compuesto por los sensores de temperatura. El primer sensor mide la temperatura ambiente y tiene como objetivo detectar los cambios en la temperatura del gas (T_a). En el otro electrodo (T_s) se tiene el elemento calefactor para aumentar la temperatura de referencia, con el fin de producir una temperatura diferencial constante, que normalmente es 25°C .

Cuando se hace pasar flujo por el medidor, se genera un efecto de enfriamiento que incrementa la temperatura diferencial entre los dos sensores. Para poder mantener la temperatura diferencial de 25°C , se aumenta la potencia al elemento calefactor, hasta regresar a la condición de temperatura

diferencial de referencia.

La potencia eléctrica necesaria para mantener la diferencia de temperatura entre los dos sensores, es proporcional al flujo másico del gas.

Resumen medidores térmicos

Ventajas

No tiene partes en movimiento.

Medición simple.

Alta precisión.

No produce caídas de presión.

Desventajas

La presión y temperatura limitan su aplicación.

Limitado en rango de medición y en tamaños de tubería.

Costo elevado.



6.14. RESUMEN MEDIDORES DE FLUJO

	Tipo de servicio		Rango ajuste	Precisión	Tramos tubería	Presión máx.	Temp. Máx.	φ tubería
	Líquido	Gas						
Pletina de orificio		Vapor	4:1	2 - 4% F.S. ¹	10 - 30 x D	100 psi	300° C	1 - 36"
Tubo venturi			4:1	1% F.S. ¹	5 - 30 x D	100 psi	300° C	2 - 48"
Boquilla de flujo			4:1	1 - 2% F.S. ¹	10 - 30 x D	100 psi	300° C	2 - 20"
Tubo Pitot			3:1	3 - 5% F.S. ¹	20 - 30 x D	100 psi	300° C	> 3"
Rotámetro			10:1	1 - 10% F.S. ¹	Ninguno	300 - 1000 psi ³	200 - 500° C ³	¼ - 4"
Desplazamiento positivo			10:1	0.1 - 0.5% rata	Ninguno	4000 psi	300° C	½ - 20"
Turbina			10:1	0.25 - 1% rata	5 - 10 x D	5000 psi	400° C	1 - 20"
Vortex			25:1	1% rata	10 - 40 x D	300 - 400 psi	400° C	1 - 12"
Magnético			40:1	0.25 - 0.5% rata	5 x D	600 - 800psi	180° C	¼ - 80"
Ultrasonido: efecto doppler			10:1	3 - 5% F.S. ¹	5 - 30 x D	N/A ²	150° C	> ½"
Ultrasonido: tiempo de tránsito			20:1	1 - 5% F.S. ¹	5 - 30 x D	N/A ²	260° C	½ - 120"
Coriolis			100:1	0.15 - 1% rata	Ninguno	900 psi	200° C	¼ - 6"
Térmico			50:1	1% F.S. ¹	10 - 40 x D	300 psi	100° C	½ - 8"

¹ La presión depende de la tubería en medidores tipo clamp on (no intrusivos).

² La presión máxima, depende de la tubería en medidores tipo clamp on (no intrusivos).

³ La presión y temperatura máximos que pueden soportar los rotámetros, depende del material de construcción. (vidrio o metal).

BIBLIOGRAFÍA

- Considine, Douglas M. (1993). *Process Industrial Instruments and Control Handbook*. 4 edition. McGraw-Hill Inc.
- D. A., Coggan; C. L., Albert (1996). *Fundamentals of industrial controls*. 2 edition, Instrument Society of America.
- Flowtech, A. G. (1989). *Flow handbook*. 1 edition. Flowtech A. G.
- Friedrich, Hofmann (2000). *Ultrasonic flow measurement*. 1 edition, KROHNE Messtechnik GmbH & Co.
- Friedrich, Hofmann (2003). *Electromagnetic flow measurement*. 3 edition. KROHNE Messtechnik GmbH & Co.
- Omega Technologies (1999). *Transactions Flow and level measurement*. Putman Publishind Company and Omega Press LLC.
- Spitzer, David W. (1990). *Industrial flow measurement*. 2 edition. Instruments Society of America.

Capítulo 7

MEDICIÓN DE NIVEL



Laguna sagrada de los Muiscas (leyenda del Dorado), Guatavita, Colombia

7.1. FORMAS DE MEDICIÓN DE NIVEL

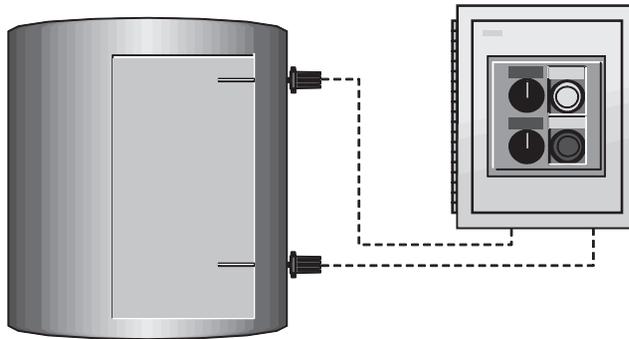
A diferencia de la medición de flujo, presión y temperatura, en la medición de nivel se encuentran bien diferenciados los métodos para medición límite y continuo. A continuación podrán encontrar las diferencias:

7.1.1. Medición límite

En algunas aplicaciones es necesario determinar si el nivel de líquido o sólido, se encuentra por encima o por debajo de un punto de referencia. Esta señal sirve para encendido o apagado de bombas, control de electroválvulas o simplemente una indicación luminosa o auditiva del nivel.

La señal de salida de un sensor de nivel límite, es un contacto cambia de estado como resultado de la presencia o no del producto sobre el sensor.

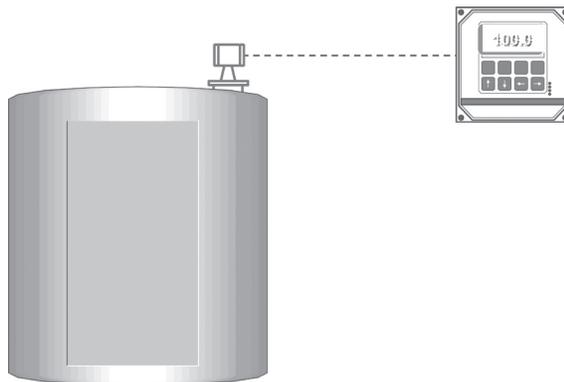
Figura 7-1. Medición de nivel límite



7.1.2. Medición continua

Un sensor de nivel continuo envía una señal proporcional al contenido del silo o tanque, normalmente en un rango de 4...20 mA. Esta señal es usada para indicación remota en un cuarto de control, registro o para control en lazo cerrado.

Figura 7-2. Medición de nivel continuo



7.2. RESUMEN MEDIDORES DE NIVEL

<i>Medición en líquidos</i>		<i>Medición en Sólidos</i>	
<i>Límite</i>	<i>Continuo</i>	<i>Límite</i>	<i>Continuo</i>
<i>Vibración</i>	<i>Presión diferencial</i>	<i>Vibración</i>	<i>Peso móvil</i>
<i>Flotador</i>	<i>Presión hidrostática</i>	<i>Tilt level switch</i>	<i>Ultrasonido</i>
<i>Capacitivo</i>	<i>Desplazador</i>	<i>Paletas rotativas</i>	<i>Radar</i>
<i>Conductivo</i>	<i>Hidrostatic Tank Gauging</i>	<i>Capacitivo</i>	<i>Nuclear</i>
<i>Ultrasonido</i>	<i>Servo Gauge</i>	<i>Nuclear</i>	<i>Microimpulsos</i>
<i>Nuclear</i>	<i>Capacitivo</i>		<i>Pesaje</i>
	<i>Radar</i>		<i>Láser</i>
	<i>Ultrasonido</i>		
	<i>Láser</i>		
	<i>Nuclear</i>		
	<i>Pesaje</i>		
	<i>Burbujeo</i>		

7.3. INSTRUMENTOS PARA MEDICIÓN DE NIVEL LÍMITE

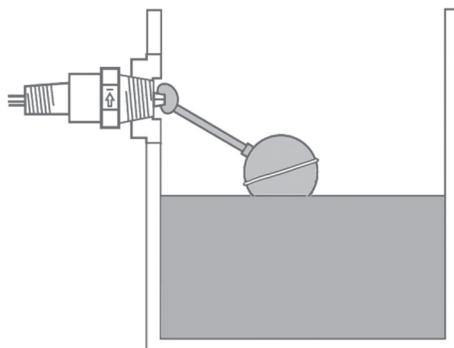
7.3.1. *Tilt level switch*

Son interruptores de nivel de sólidos fabricados con un microinterruptor o con ampolletas de mercurio y que se montan en la parte superior del tanque. El principio es similar al de tipo flotador, si el tilt level switch cuelga libremente no hay contacto a la salida. Cuando el nivel cambia, el ángulo vertical de sensor cambia y esto causa el cierre del contacto. Esta señal activa un relé externo para indicación, control de bombas, alarmas, etc.

7.3.2. Flotador

Consiste en un flotador fabricado en polipropileno o acero inoxidable, con una ampolleta de mercurio o un microinterruptor, que detecta el desplazamiento del mismo. El contacto está normalmente abierto cuando el tanque se encuentra por debajo del nivel del sensor. Cuando el líquido sube, el flotador se desplaza hacia la parte superior del líquido, lo que origina un cambio en la posición del flotador, cerrando un contacto que indica la presencia de nivel en ese punto.

Figura 7-3. Flotador mecánico

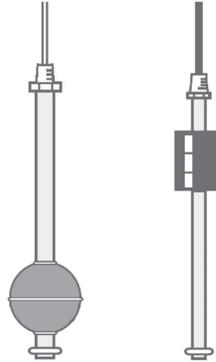


7.3.3. Flotador magnético

Consiste en un vástago donde se desplaza un flotador. Sobre el vástago se instala uno o varios reed switch, en los puntos donde se quiere tener la señal de nivel. Un reed switch está construido con una ampolleta de vidrio. El contacto se activa, cuando un campo magnético se aproxima al sensor.

El flotador está provisto de unos imanes, que generan un campo magnético sobre el vástago. Cuando el flotador llega al punto donde se encuentra el reed switch, este se cierra generando una salida correspondiente al nivel.

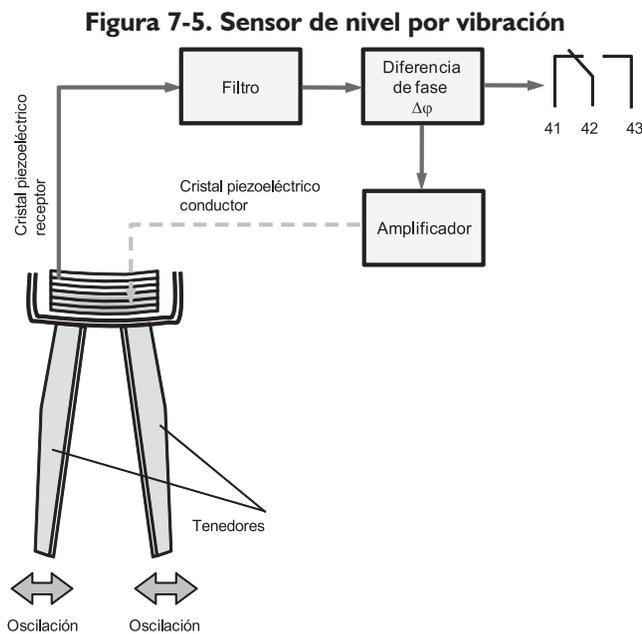
Figura 7-4. Flotador magnético



7.3.4. Vibración

Está basado en el principio que un material líquido o sólido amortiguará la vibración o fuerza de vibración y por lo tanto, se genera un cambio en la frecuencia de resonancia.

La fuerza de vibración es generada por un cristal piezoeléctrico, que vibra a una frecuencia de resonancia de 4.000 Hz en el aire. La fuerza de vibración está diseñada para que cuando el equipo es sumergido en el medio, se disminuya la frecuencia de resonancia. La indicación de nivel se realiza por la activación de un contacto, cuando se detecta la presencia de material.



Resumen sensores de nivel por vibración

Ventajas

- No requiere calibración, ni mantenimiento.
- Insensible a la adherencia del producto.
- Independiente de las propiedades eléctricas del material.
- Insensible a los cambios de viscosidad.
- Amplio rango de temperatura y presión de trabajo.

Desventajas

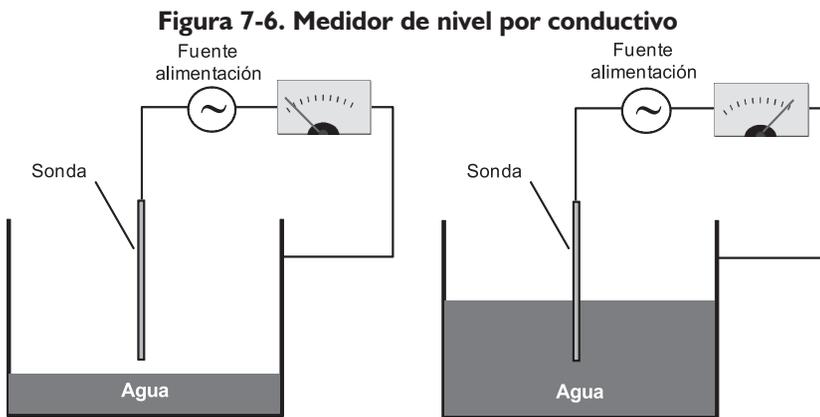
- No recomendado con sólidos, con tamaño de partícula mayor a 10 mm.

7.3.5. Conductivo

Este método se aplica a las mediciones límite, donde el líquido es un material conductor de la electricidad.

En tanques no metálicos se usan dos sondas y cuando el líquido entra en contacto con los electrodos, se cierra el circuito eléctrico.

La impedancia mínima del líquido debe ser de $20 \text{ M}\Omega/\text{cm}$. Para evitar riesgos eléctricos, la tensión de alimentación es tan solo algunos voltios. La alimentación debe ser de corriente alterna, para evitar el efecto de oxidación por causa de la electrólisis.



Resumen sensores de nivel por conductividad

Ventajas

- Bajo precio por punto de medición.
- Sistema simple para control de dos puntos o más puntos.
- Punto de activación preciso.
- Amplio rango de temperatura y presión de trabajo.

Desventajas

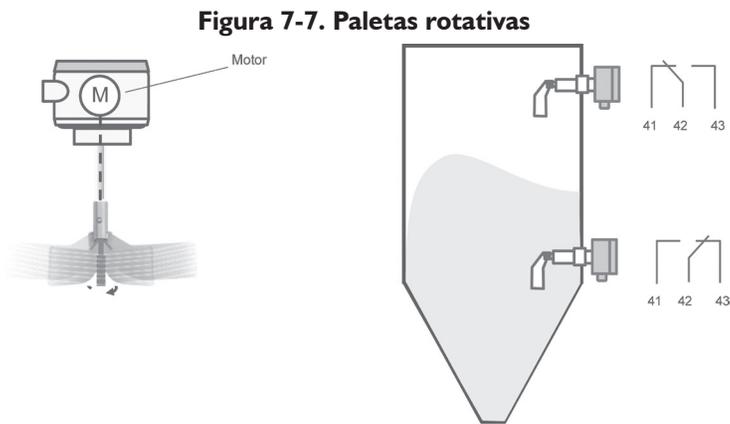
- Solo para líquidos conductores.
- Puede presentar falsas señales con líquidos no homogéneos, que puedan aislar los electrodos.

7.3.6. Paletas rotativas

Consiste en un eje vertical, provisto de una paleta que gira constantemente a baja velocidad, accionada por un motor sincrónico.

Cuando el producto sólido llega a las paletas, las inmoviliza, accionando dos contactos. El primer contacto genera una señal de nivel y el segundo contacto apaga el motor.

Cuando el nivel cae por debajo de las paletas, un resorte permite activar la operación del motor y cambiar el contacto de salida de nivel, a su posición original.



Resumen sensores de nivel por paletas rotativas

Ventajas

- Bajo costo.
- Medición simple.

Desventajas

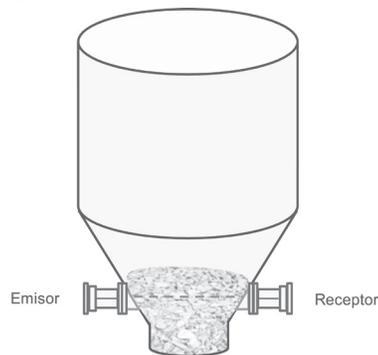
- Debe protegerse de la descarga directa de material.
- Presión y temperatura limitada.

7.3.7. Barrera microondas

En las barreras microondas, un emisor envía ondas electromagnéticas de alta frecuencia que son recibidas y detectadas por un receptor situado al otro lado del tanque.

Los materiales interpuestos en el trayecto debilitan o interceptan la energía enviada y generan el cambio de contacto para indicación de nivel. Las paredes de un tanque no metálico, son atravesadas por las microondas. Por el contrario, si las paredes del tanque son metálicas, es necesario colocar una ventana de plástico o vidrio, en la trayectoria donde pasan las microondas.

Figura 7-8. Barrera de microondas



Resumen sensores de nivel por barrera de microondas

Ventajas

Medición no invasiva y sin contacto con el producto.

Aplicación universal desde polvo hasta sólidos de gran tamaño.

Medición no afectada por la suciedad del sensor, vapores o polvo en el ambiente.

Desventajas

Costoso.

Técnica no muy difundida.

7.4. BURBUJEO

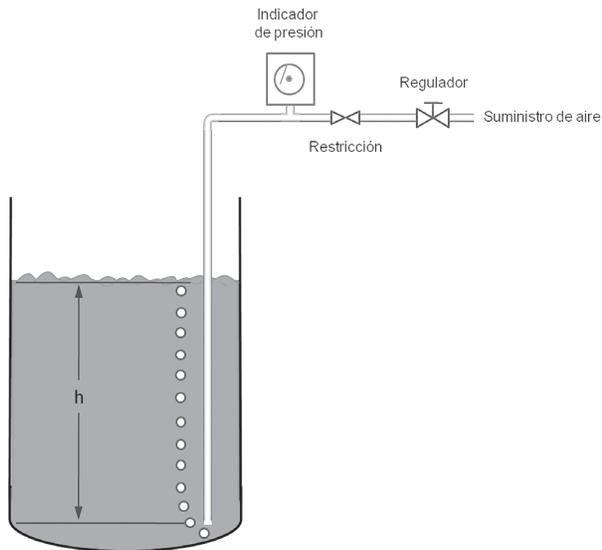
En este método, la presión hidrostática dentro del tanque es medida insertando un tubo delgado dentro del líquido y aplicando aire comprimido en el tubo, de tal forma que la columna del líquido genera contrapresión y donde burbujas de aire son forzadas a salir a la superficie.

De esta forma el medidor o transmisor de presión puede ser instalado en la parte superior del tanque, alejado de fluidos corrosivos y potencialmente dañinos. También puede ser usado en tanques subterráneos, donde el acceso es limitado. Como el tubo es sumergido en todo el rango de medición, el sistema de burbujeo es inmune a turbulencia, espuma y productos viscosos.

Es un método económico, fácil de instalar y puede cubrir toda la altura del tanque. Su exactitud depende de la estabilidad en la presión de suministro de aire limitada por un regulador.

Si el producto tiende a adherirse o solidificar, la tubería puede taparse causando excesiva presión y mayor lectura, que la del nivel real.

Figura 7-9. Medición de nivel por burbujeo



Resumen sensores de nivel por burbujeo

Ventajas

Método de medición simple y de bajo costo.

Medición sin contacto con el proceso, especial para líquidos corrosivos.

Desventajas

Alto consumo continuo de aire.

Los cambios de presión pueden afectar la precisión.

Requiere mantenimiento constante.

7.5. PRESIÓN HIDROSTÁTICA

La medición de nivel por presión hidrostática se basa en el principio, que la presión medida en el fondo del tanque es proporcional a la altura del líquido. En la medición por presión hidrostática, no tiene influencia el diámetro del tanque.

La medición por presión hidrostática se puede expresar en la siguiente fórmula:

$$P = \rho \times g \times h$$

Donde:

P : Presión medida.

ρ : Gravedad específica del líquido.

g : Aceleración debido a la gravedad.

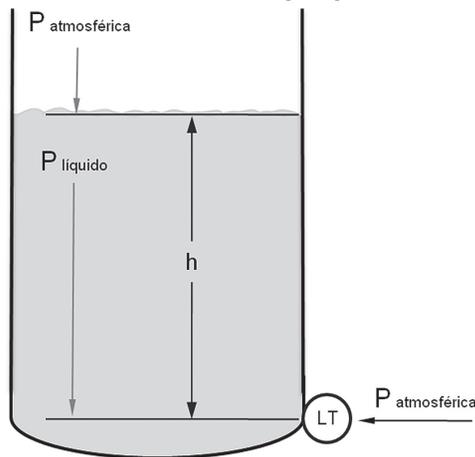
h : Altura de la columna del líquido.

Ecuación 7-1. Cálculo de presión hidrostática.

En la medición de nivel por presión hidrostática, se debe tener en cuenta qué tanque debe estar referenciado a la presión atmosférica. Por esta razón no es necesario, una compensación por los cambios en la presión interna del tanque.

En el caso de aplicaciones con presión interna diferente a la presión atmosférica, se debe instalar un sensor adicional en la parte superior del tanque o se debe usar un transmisor de presión diferencial. En este caso se debe instalar la toma de baja presión, en la parte superior del tanque.

Figura 7-10. Medición de nivel por presión hidrostática



Resumen sensores de nivel por presión hidrostática

Ventajas

Sensor especialmente diseñado para aplicaciones de nivel.

La medición no es afectada por la espuma, cambios en conductividad o constante dieléctrica.

Se pueden instalar diafragmas, para separar el sensor del líquido de proceso.

Buena precisión.

Desventajas

El cambio de densidad del líquido, provoca errores en la medición.

En tanques presurizados o al vacío, se requiere la instalación de dos sensores.

7.6. PRESIÓN DIFERENCIAL

Los transmisores de presión diferencial pueden ser empleados en aplicaciones de nivel en tanques presurizados o con presiones por debajo de la presión atmosférica.

El transmisor de presión diferencial mide la presión ejercida por la columna del líquido, compensando los cambios en la presión interna del tanque. Matemáticamente se puede expresar por medio de la siguiente fórmula:

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

Donde:

ΔP : Diferencial de presión.

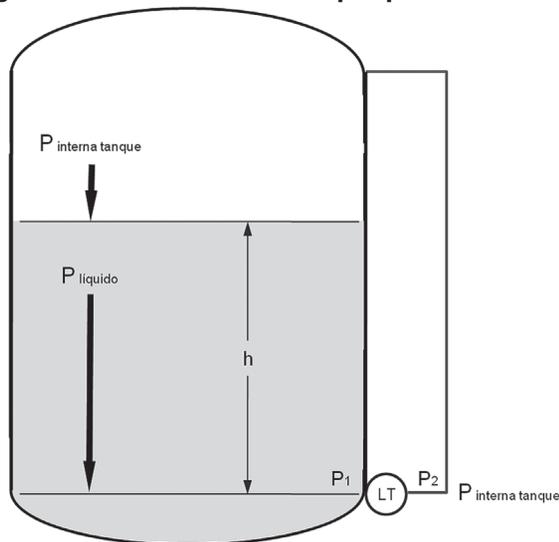
P_1 : Presión columna de líquido + presión interna del tanque.

P_2 : Presión interna del tanque.

Ecuación 7-2. Cálculo de presión diferencial.

Teniendo en cuenta que la toma de baja presión, contrarresta la influencia de la presión interna sobre el líquido medido, la presión diferencial medida, solo dependerá de los cambios de la presión ejercida por la columna de líquido.

Figura 7-1 I. Medición de nivel por presión diferencial



Resumen sensores de nivel por presión diferencial

Ventajas

Medición de nivel en tanques presurizados o al vacío.

No afectado por cambios de conductividad o composición del producto.

Buena precisión.

Desventajas

No aplicable en líquidos, donde se produzcan cambios de densidad.

El error en la medición puede incrementarse en tanques con presiones estáticas demasiado altas.

7.7. HIDROSTATIC TANK GAUGING

Es una de las técnicas más viejas para medir el contenido de tanques. En la industria de proceso para la medición de nivel, es muy común el uso de transmisores de presión diferencial. Normalmente se usan transmisores de presión con una exactitud cercana a 0,25%. Sin embargo, el inventario de tanques requiere mejor exactitud. Por eso el HTG incorpora transmisores de presión, para medición continua de la masa del producto contenido en el tanque. El HTG combina presión, temperatura, masa, densidad, volumen y nivel. El Hidrostatic Tank Gauging ofrece un sistema de medición preciso para inventario de líquidos.

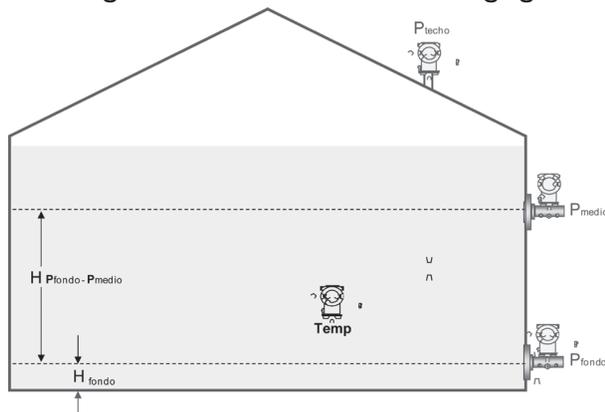
El HTG ofrece muchos beneficios adicionales a la medición de nivel por presión. Teniendo en cuenta que los sensores están ubicados cerca del fondo del tanque, ellos eliminan los errores que ocurren con los sistemas de medición, montados en el techo del tanque, ocasionados por el movimiento del techo flotante, comunes en almacenamiento de combustible.

El HTG puede calcular cuatro mediciones básicas, con tres transmisores de presión y uno de temperatura. Las salidas de estos equipos son enviadas a una interface donde se compilan los datos y donde se realizan los cálculos.

La medición de masa es determinada por la presión diferencial, medida entre los transmisores del techo y el fondo del tanque, multiplicando por el área promedio del tanque.

La densidad está determinada por la diferencia de presión, entre el transmisor del medio y el de fondo, multiplicando por la distancia entre ellos. El volumen del tanque es determinado por la medición de masa, dividida por la densidad medida.

Figura 7-12. Hidrostatic Tank Gauging



La medición de nivel está basada en la diferencia entre la medición de nivel de techo y la del fondo, dividida por la densidad.

La medición de temperatura tomada entre el transmisor de presión del medio y el fondo, es combinada con la medición de densidad del producto y sirve para calcular la densidad y el volumen estándar. Si el tanque es abierto a la atmósfera, el transmisor de techo no es necesario. En tanques cerrados el cálculo de masa, densidad, nivel y volumen se realiza por medio de las siguientes fórmulas:

$$Masa = (P_{fondo} - P_{techo}) \times Area$$

$$Densidad = \frac{P_{fondo} - P_{medio}}{H_{fm} \times Gravedad}$$

$$Volumen = \frac{Masa}{Densidad}$$

$$Nivel = \left(\frac{P_{fondo} - P_{techo}}{Densidad} \right) \times H_{fondo}$$

Ecuación 7-3. Cálculo masa, densidad, volumen y nivel en medidor HTG.

Resumen sensores de nivel HTG

Ventajas

Medición de volumen, nivel, densidad y temperatura.

Ideal para aplicaciones de control de inventario, transferencia de custodia, control de pérdidas, entre otras.

Alta precisión.

Desventajas

Sistema complejo (hardware y software).

Costo alto.

7.8. ULTRASONIDO

Para la medición de nivel por ultrasonido, se instala un sensor en la parte superior del silo o tanque. El transmisor envía impulsos eléctricos al sensor, para generar la señal de ultrasonido que se desplaza hacia la superficie del producto. Las ondas de ultrasonido son reflejadas, debido al cambio de densidad entre el aire y el producto. Una señal de retorno es enviada hacia el sensor para evaluación del nivel.

El tiempo transcurrido entre el envío de la señal desde el sensor y el retorno del eco, es usado para determinar la distancia mediante la siguiente fórmula:

$$d = Cx \frac{t}{2}$$

Donde:

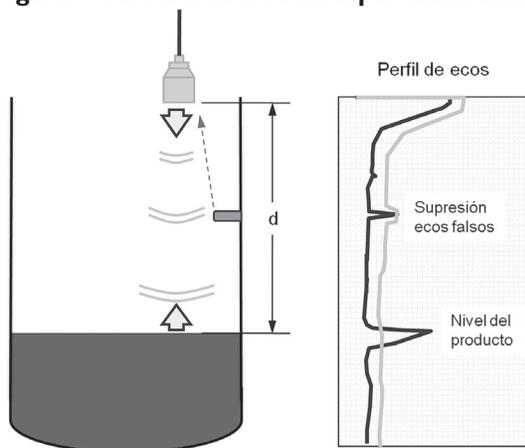
d: Distancia sensor - producto.

C: Constante velocidad del sonido (340 m/s).

t: Tiempo transcurrido entre la emisión y recepción.

Ecuación 7-4. Cálculo distancia medidor de nivel por ultrasonido.

Figura 7-13. Medición de nivel por ultrasonido



El ultrasonido requiere aire o gas para su propagación. Por esta razón esta técnica no es recomendada en silos o tanques que se encuentren al vacío. También se debe verificar la aplicación de ultrasonido en aplicaciones con presiones internas mayores de 1 Bar.

Para el caso de altas temperaturas, se deben verificar los límites máximos que pueden soportar los sensores seleccionados.

La lectura puede ser afectada por la presencia de polvo, vapor, vapores de proceso, altas temperaturas y presiones. La presencia de espuma en la superficie del líquido puede generar reducción en la energía reflejada o la reflexión sobre el nivel de espuma y no del líquido. La cantidad de absorción y reflexión de la espuma depende de su composición (si las burbujas son densas o delgadas).

La reflexión del sonido depende de las propiedades del producto a medir. En el caso de los líquidos, se espera que gran parte de las ondas de sonido reflejen y retornen en la misma dirección al sensor y las pérdidas por reflexión sean mínimas.

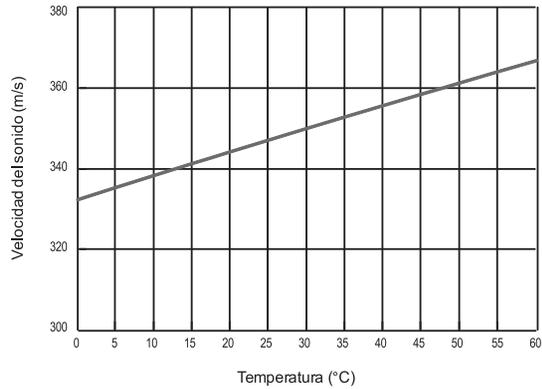
En el caso de los sólidos debido al ángulo de reposo del material, solo parte de la señal enviada es reflejada y gran parte de la señal se pierde en diferentes direcciones. Las pérdidas de la señal no solo dependen del ángulo de reposo del material, sino también de la granulometría del producto.

Figura 7-14. Reflexión de ultrasonido en líquidos y sólidos



La velocidad del sonido, depende del medio de propagación y de su temperatura. La velocidad del sonido en el aire es de 331 m/s a 0°C, pero la velocidad de propagación cambia por efecto de la temperatura. Por eso es necesario que el sensor tenga incorporada la medición de temperatura, para medir y compensar los cambios que se pueden presentar en la atmósfera interna. Cuando incrementa la temperatura, la velocidad del sonido cambia a razón de 0,17%/°C (ver figura 7-15).

Figura 7-15. Variación de la velocidad del sonido por efecto de la temperatura



Resumen sensores de nivel por ultrasonido

Ventajas

- Medición sin contacto con el producto.
- Medición de líquidos, lodos y sólidos.
- Puede trabajar en zonas con riesgo de explosión.
- Aplicable a todo tipo de tanques.

Desventajas

- Aplicación limitada en líquidos con espuma.
- La composición de la atmósfera interior del tanque, debe permanecer estable.
- Presión y temperatura de proceso limitada

7.9. MICROONDAS (RADAR)

Impulsos cortos de microondas son generados y emitidos por la antena del sensor hacia el producto. La diferencia entre la constante dieléctrica entre el medio y el producto provocan la reflexión, que es retornada en forma de eco a la antena del sensor.

La distancia hasta la superficie del producto, es determinada midiendo el tiempo desde el envío de los impulsos de las microondas y el retorno del eco, por medio de la siguiente fórmula:

$$d = Cx \frac{t}{2}$$

Donde:

d: Distancia sensor - producto.

C: Constante velocidad de la luz (299,792 Km/s).

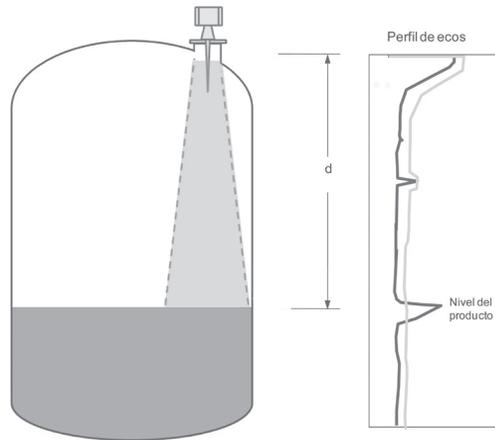
t: Tiempo de reflexión entre emisión y recepción.

Ecuación 7-5. Cálculo distancia medidor de nivel por radar.

Las microondas se propagan con la velocidad de la luz. El tiempo medido es aproximadamente 1.000.000 de veces más corto que en un sistema ultrasónico. Una distancia de un metro es cubierta por las ondas electromagnéticas, en aproximadamente 3,3 milisegundos.

Las microondas son ondas electromagnéticas que se propagan a la velocidad de la luz, en forma similar a la radiación óptica. Al contrario que el ultrasonido, las microondas no requieren medio de transmisión. Por lo tanto, es posible realizar la medición en vacío y con altas presiones. La velocidad de propagación cambia levemente en caso de temperaturas extremas, por lo tanto, podrá decirse que la medición no depende de la temperatura. La composición de la atmósfera interna tampoco es muy importante.

Figura 7-16. Medición de nivel por microondas



Las microondas pueden ser reflejadas en una superficie conductiva eléctricamente, pero líquidos no conductivos también pueden ser medidos.

La diferencia entre la constante dieléctrica del aire ($\epsilon_r = 1$) y el producto determina el grado de reflexión. Con constantes dieléctricas $\epsilon_r > 3$, la mayor parte de la señal es reflejada y puede ser fácilmente medida.

Existen tres técnicas para la medición de nivel por microondas: FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave), PTOF (Pulsed Time Of Flight) y TDR (Time Domain Reflectometry).

Onda continua de frecuencia modulada (FMCW): Es una medición con muy buena exactitud, ignora vapor y es inmune a los cambios de las características físicas del producto (excepto de la constante dieléctrica).

Tiempo al vuelo pulsante (PTOF): Es de bajo consumo y muy bajo precio. Debido a su baja potencia su desempeño es limitado por la presencia de obstrucciones en el interior del tanque, agitación, espuma, elevada presión y materiales con baja constante dieléctrica.

Reflectometría con dominio de tiempo (TDR): A diferencia de los métodos anteriores, el TDR es una medición intrusiva que usa una varilla o un cable flexible, que sirve como canal de impulso de las microondas. Este método puede medir nivel de líquidos, sólidos o interfaces. Puede medir grandes longitudes y tiene un buen desempeño en productos con baja constante dieléctrica. Este método también es llamado, radar de onda guiada.

Resumen sensores de nivel por microondas

Ventajas

Medición sin contacto con el producto.

No afectado por las condiciones atmosféricas, dentro del silo o tanque.

Medición independiente de las propiedades del producto.

Es posible la medición externa al tanque a través de una ventana de vidrio, plástico, cerámica, etc.

Medición en tanques con vacío, altas presiones y altas temperaturas.

Desventajas

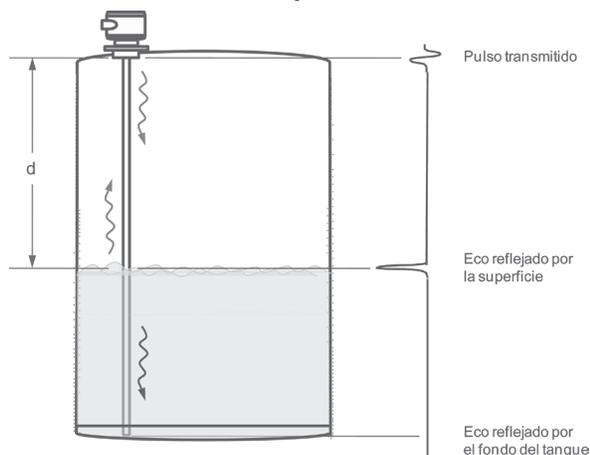
Aplicación limitada, para productos con baja constante dieléctrica.

La medición de nivel en sólidos es limitada y solo algunos fabricantes la ofrecen.

7.10. RADAR DE ONDA GUIADA

El sensor está basado en el principio de la medición del tiempo en vuelo, de la señal enviada al interior del silo o tanque. Un impulso eléctrico es lanzado y guiado hacia la parte baja de la sonda de medición, la cual actúa como una línea de transmisión de onda. Cuando la onda encuentra el producto, esta es reflejada parcialmente. Los impulsos reflejados, viajan de regreso hacia el sensor donde se contabiliza el tiempo de tránsito.

Figura 7-17. Medición de nivel por microondas de onda guiada



La distancia D a la superficie del producto es proporcional al tiempo en vuelo del pulso.

$$d = Cx \frac{t}{2}$$

Donde:

d : Distancia vacío del tanque.

C : Constante de la velocidad del sonido.

t : Tiempo de tránsito de la señal.

Ecuación 7-6. Cálculo distancia en radar de onda guiada.

Resumen sensores radar de onda guiada

Ventajas

Medición simple.

Muy exacto.

Puede medir nivel en líquidos con baja constante dieléctrica.

Desventajas

Montaje complejo.

Costoso.

Limitado en aplicaciones, donde el producto se pueda adherir a la sonda.

7.11. LÁSER

El transmisor emite cortos impulsos de luz infrarroja los que son reflejados en la superficie del material. La luz reflejada es recibida por un fotodiodo. El periodo de tiempo desde la emisión y recepción del impulso de luz es medido. Un microprocesador calcula la distancia entre el instrumento de medición y la superficie del producto de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$d = Cx \frac{t}{2}$$

Donde:

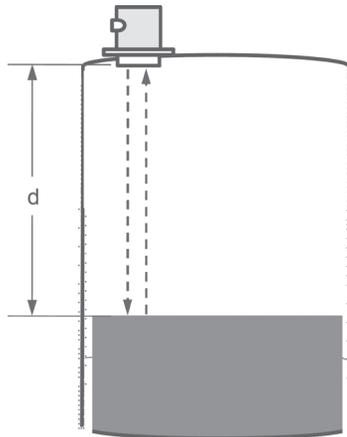
d : Distancia sensor - producto.

C : Constante velocidad de la luz (299,792 Km/s).

t : Tiempo de propagación.

Ecuación 7-7. Cálculo distancia medidor de nivel láser.

Figura 7-18. Medición de nivel por láser



El medidor láser permite la instalación del equipo externo al tanque, a través de una ventana. Las condiciones internas del tanque tienen una influencia despreciable en el cambio de la velocidad de la luz y en el resultado de la medición. Estas condiciones pueden ser presión, vacío, temperaturas extremas, productos agresivos e interferencias eléctricas y acústicas que pueden causar fallas en la medición en otros sistemas.

Dos tipos de tecnologías actualmente son comunes para el control de procesos: La tecnología de onda pulsante y la tecnología de onda continua (fre-

cuencia modulada). Es importante conocer las diferencias fundamentales de operación entre las dos tecnologías y la aplicación de cada una de ellas.

La tecnología pulsante está basada en el tiempo en vuelo basado en la medición del trayecto de pulsos láser individuales desde el transmisor del instrumento hacia el producto y de regreso al receptor.

La tecnología de onda continua dirige un rayo láser continuo al producto. El rayo de luz retornado al receptor por el producto está desfasado con respecto al enviado por el transmisor.

En general, se prefieren los medidores de pulso láser para la mayoría de aplicaciones industriales debido a que tienen una mejor característica de penetración a través del polvo o vapor sin sacrificar exactitud y repetibilidad.

El medidor láser pulsante tiene propiedades que superan otros métodos de medición de nivel. Es un medidor no intrusivo, puede ser usado para conectar al proceso a través de una ventana y aislado de las condiciones internas del tanque. El rayo del láser es muy angosto lo que permite tener una mínima divergencia (típicamente $0,3^\circ$). Este rayo angosto es ideal para aplicaciones de tanques con geometría compleja con agitadores, obstrucciones y soportes internos.

Una de las propiedades más funcionales y flexibles del medidor láser es la habilidad para medir diferentes tipos de material. Se pueden medir efectivamente sólidos y líquidos sin ajustes de temperatura, constante dieléctrica del material, densidad y otras propiedades físicas.

Resumen sensores de nivel láser

Ventajas

Medición simple y sin contacto.

Puede realizarse la medición a través de una ventana del tanque.

Medición de nivel en tanques presurizados, al vacío o con altas temperaturas.

Desventajas

Uso limitado a líquidos con buena reflexión (no aplicable a líquidos translúcidos o negros).

Técnica no muy difundida.

Costo alto.

7.12. CAPACITIVO

Un medidor de nivel capacitivo determina el nivel, midiendo la capacidad entre las placas del condensador. En líquidos no conductivos el circuito de medición aplica una señal de alta frecuencia a la sonda, la cual actúa como una de las placas del condensador. La segunda placa puede ser la pared del tanque o una sonda de referencia. La capacidad medida es calculada por la siguiente fórmula:

$$C = \frac{\epsilon_r \times \epsilon_o \times A}{d}$$

Donde:

C: Capacidad.

ϵ_r : Constante dieléctrica.

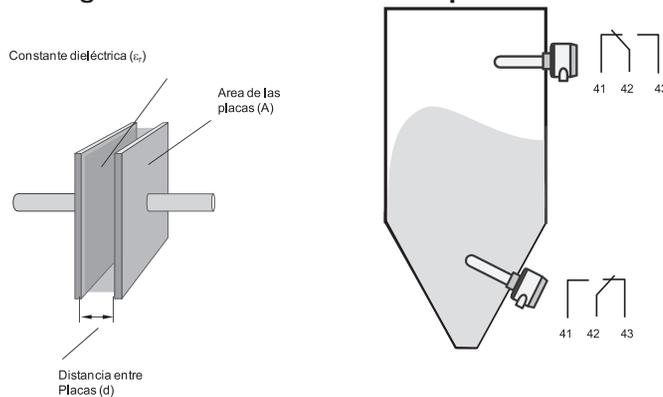
ϵ_o : Constante de campo eléctrico (8.84×10^{-12})

A: Área de las placas del condensador.

d: Distancia entre las placas.

Ecuación 7-8. Cálculo capacidad de un condensador.

Figura 7-19. Medición de nivel capacitivo límite



Los medidores capacitivos son adaptables a una gran variedad de aplicaciones de nivel. Ellos pueden medir tanto nivel límite como continuo en sólidos y líquidos. También es posible medir interfaces de dos líquidos, que tengan diferentes constantes dieléctricas. Debido a que no tienen partes en movimiento, son ideales en aplicaciones con líquidos muy viscosos, lodos y en aplicaciones

donde se pueda generar turbulencia.

Otra ventaja es el amplio rango de presiones y temperaturas, que tiene un efecto pequeño en los sistemas de medición capacitivos. Sin embargo, esta técnica no es recomendable, en procesos donde el material presenta cambios en la constante dieléctrica.

El producto a medir puede ser de dos tipos: conductivo que generalmente involucra fluidos basados en agua y no conductivo basados en hidrocarburos. En el caso de líquidos conductivos, deben usarse sondas aisladas generalmente con teflón.

Para medición continua la fórmula del condensador de placas paralelas debe ser reemplazada por la fórmula 5-9, aplicada a los condensadores cilíndricos:

$$C = \frac{2\pi \times \epsilon_r \times \epsilon_0 \times L}{\ln D/d}$$

Donde:

C : Capacidad.

ϵ_r : Constante dieléctrica.

ϵ_0 : Constante de campo eléctrico (8.84×10^{-2}).

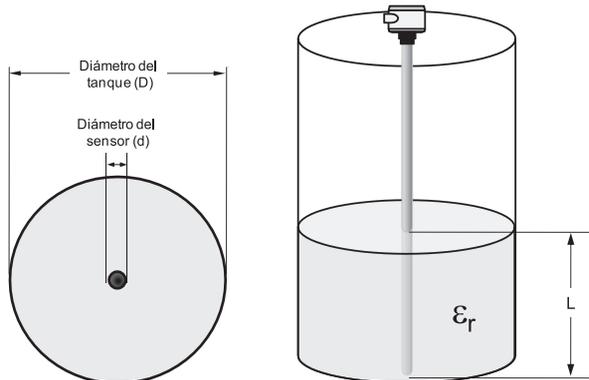
L : Longitud electrodo.

D : Distancia entre las placas.

d : Diámetro de los electrodos.

Ecuación 7-9. Cálculo capacidad medidor capacitivo continuo.

Figura 7-20. Medición de nivel capacitivo continuo



La construcción del tanque juega un papel importante en el funcionamiento de un medidor de nivel capacitivo. Los tanques metálicos con paredes rectas, pueden ser usados como una placa del condensador. En tanques metálicos con paredes curvas como es el caso de tanques cilíndricos horizontales, se requiere usar un segundo electrodo de referencia que sirve como la segunda placa del condensador, para producir una salida lineal. En otras aplicaciones el cambio de capacidad, no es suficiente para el rango de nivel deseado. En este caso el tamaño de la sonda puede ser modificado, para aumentar el cambio de capacidad o se puede instalar un tubo concéntrico alrededor del electrodo de medición. Esto permite incrementar la sensibilidad, en el cambio de capacitancia.

Muchos factores pueden causar cambios en la constante dieléctrica del líquido. Un incremento en la temperatura de 1°C, puede hacer variar la constante dieléctrica en 0,1%. Los cambios en la estructura física y química del líquido, también pueden generar cambios en la constante dieléctrica del producto medido.

Normalmente la atmósfera dentro del tanque, tiene una constante dieléctrica de 1 y esto no ocasiona errores significativos. En caso que en el interior del tanque se produzcan vapores, podría incrementarse la constante dieléctrica y esto podría producir errores adicionales en la medición.

Algunos líquidos pueden ocasionar adherencia sobre la sonda. Si el material adherido es conductivo, el efecto es menos pronunciado. Si el material se adhiere de forma regular, un circuito de compensación de empastamiento (*build up*) puede ser activado. Si el material se adhiere de forma irregular y tiende a formar capas cerca del tanque, la sonda podría simplemente tener un tramo inactivo, de un material aislante como teflón.

Otra aplicación de las sondas de nivel por capacidad, es la detección de interfaces, por ejemplo la detección de agua en tanques de almacenamiento de combustible.

El sistema de medición de interfaces por capacidad, ofrece muchas ventajas comparado con otros métodos, basados en la diferencia de densidades. La medición de interfaces agua-combustible, se puede realizar por capacitancia teniendo en cuenta que la constante dieléctrica del agua es aproximadamente 80 y la del combustible aproximadamente 3.

Para la calibración del medidor en vacío, la sonda debe estar sumergida totalmente en el combustible y para el 100% de nivel la sonda se calibra totalmente sumergida en agua. En esta aplicación el combustible reemplazaría el aire, presente en una aplicación de medición de nivel normal.

Resumen sensores de nivel tipo capacitivo

Ventajas

- Medición en altas temperaturas, altas presiones y vacío.
- Medición de productos con alta viscosidad o alto contenido de sólidos.
- Medición de interfaces.
- No tiene partes en movimiento.

Desventajas

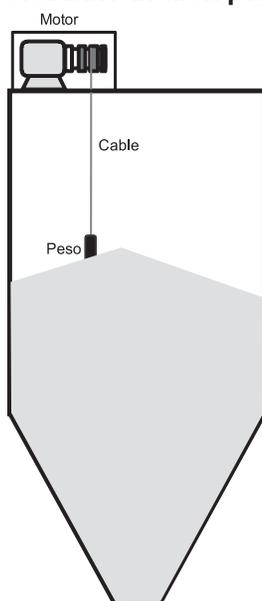
- En aplicaciones donde hay adherencia de producto, se deben usar versiones que tengan compensación contra empastamiento (*build up*).
- Se debe hacer ajuste de la sensibilidad con el producto a medir, en el momento de la instalación.

7.13. PESO MÓVIL

Un cable de medición con un peso sensible instalado en el extremo es conducido hacia el silo por medio de un motor. Cuando el peso alcanza la superficie del producto, la cinta pierde tensión y para el motor. Una unidad de programación evalúa el desplazamiento de la cinta dentro del silo, por medio de sensores ópticos.

Esta lectura de nivel es almacenada en la memoria del programador y el motor regresa a su posición de partida, en la parte alta del silo. Esta secuencia se repite continuamente, a intervalos fijos programados en el equipo.

Figura 7-21. Medidor de nivel por peso móvil



Se dispone de diferentes formas y materiales del peso, dependiendo del producto a medir.

Para la selección del peso debe tenerse en cuenta:

1. El peso nunca debe enterrarse dentro del producto; debe cambiar la tensión del cable para poder detectar el nivel del producto.
2. El peso debe ser de material compatible químicamente con el producto a medir y la temperatura en el interior del silo.

Los pesos que normalmente se usan en aplicaciones industriales son: peso

estándar, peso araña, peso bolsa y peso flotador.

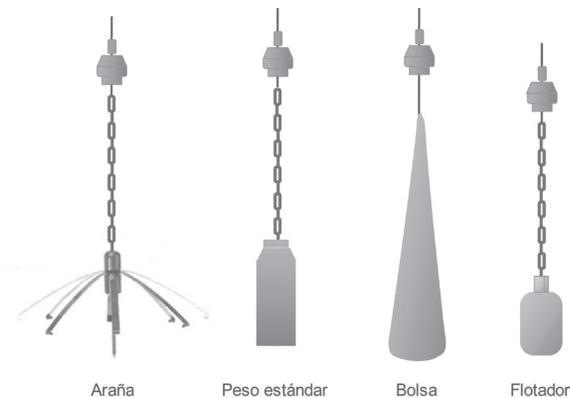
Peso estándar: Es usado en aplicaciones de sólidos de granos como minerales, carbón y granulados. Pueden ser contruidos en plástico, aluminio y acero dependiendo del producto a medir.

Peso bolsa: Es ideal para sólidos muy finos como harina, arroz, cereales, etc., donde la temperatura no supere los 100°C. La bolsa está fabricada de cuero o material sintético y se rellena del mismo producto a medir.

Peso araña: Al igual que el peso bolsa, puede usarse en sólidos finos como polvo de carbón, harina o plástico en polvo. Se puede usar en aplicaciones de altas temperaturas donde el peso bolsa no puede ser usado.

Peso flotador: Se usa en toda clase de líquidos, principalmente combustibles.

Figura 7-22. Tipos de pesos, medidor peso móvil



Resumen sensores de nivel por peso móvil

Ventajas

Equipo robusto para medición de nivel en silos, con alturas hasta 70 metros.

Es posible la medición en sólidos de grano fino y grano grueso (dependiendo del peso).

Medición precisa.

Desventajas

La medición no se puede realizar cuando el silo se está llenando.

La medición no es continua (actualización en minutos).

Requiere mantenimiento frecuente.

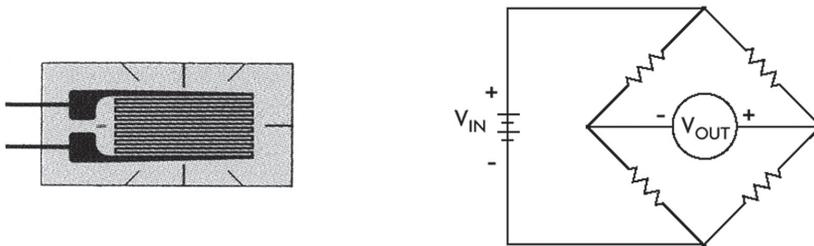
7.14. PESAJE

Para entender cómo se realiza la medición de peso con celdas de carga, inicialmente se debe conocer el principio de funcionamiento de las galgas extensométricas o strain gages.

El término *strain* está referido a la medición del cambio en alguna dimensión lineal de un cuerpo, cuando es sometido a fuerzas externas.

Un strain gage es realmente un tramo de alambre delgado de fabricación especial, curvado en forma de red y puesto en medio de dos piezas de papel o plástico aislante, con cemento entre ellas.

Figura 7-23. Strain gages y puente de Wheatstone



Para obtener una señal eléctrica, es necesario conectar cuatro strain gages en forma de puente de Wheatstone. Todos los strain gages tienen el mismo valor de resistencia, en el caso que el puente esté balanceado.

Cuando se aplica peso a las celdas de carga, los strain gages son sometidos a esfuerzos que provocan cambios de resistencia. Este cambio ocasiona desbalance en el puente y un incremento en la salida de milivoltios, proporcional a la carga aplicada.

Un indicador toma la señal de milivoltios, para visualizar el peso en el interior del silo o tanque.

Figura 7-24. Medición de nivel por pesaje

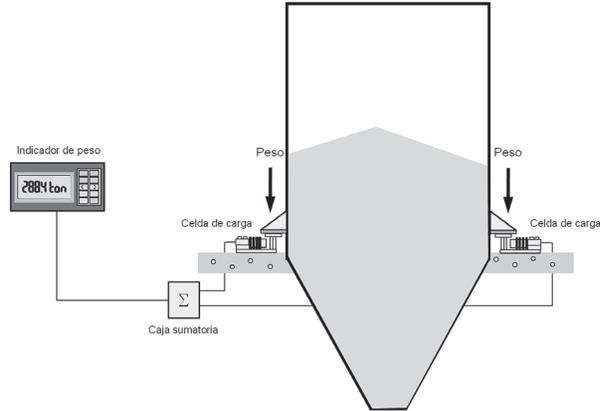
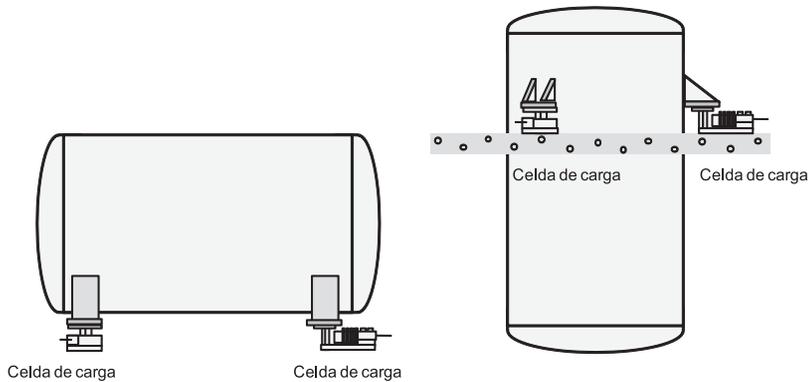


Figura 7-25. Disposición de celdas de carga en silos y tanques



Resumen sensores de nivel por pesaje

Ventajas

- Medición directa de peso.
- Alta precisión.
- Medición independiente de las características del producto.
- No hay influencia del ángulo de reposo, en silos con material sólido.
- Aplicable a todo tipo de líquidos y sólidos.
- Medición sin contacto con el producto.

Desventajas

- Costos de instalación elevados.
- Requiere calibración continua.
- Sistema poco usado en tanque y silos ya instalados.

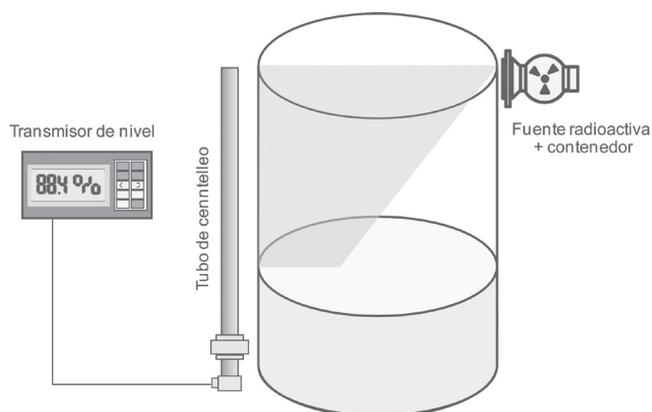
7.15. RADIACIÓN

Opera basado en la radiación gamma, emitida por una fuente contenida en una carcasa y montada a un lado del tanque. La radiación de la fuente es direccionada a las paredes del tanque y medida por un detector instalado en la pared del lado opuesto. El detector convierte la radiación gamma en impulsos eléctricos. El número de impulsos decrece de acuerdo a la atenuación de la radiación, cuando el nivel del producto aumenta.

Un sistema de medición de nivel por radiación está compuesto por cuatro elementos:

1. Fuente radiactiva.
2. Contenedor.
3. Detector.
4. Unidad electrónica de evaluación (transmisor).

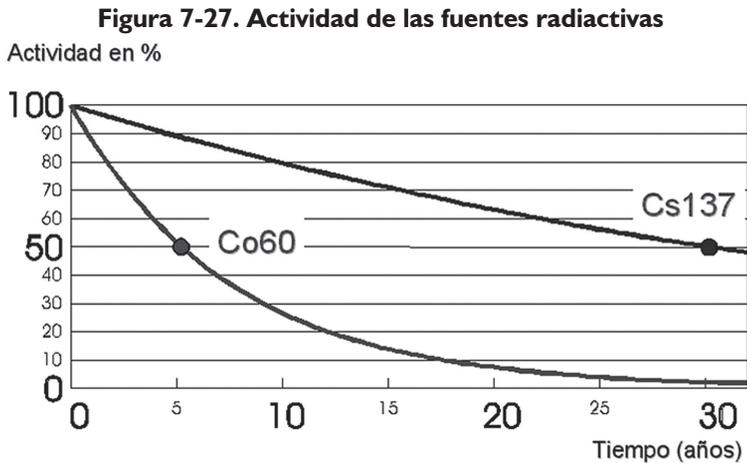
Figura 7-26. Medición de nivel continuo por radiación



7.15.1. Fuente

El cobalto 60 ($Co60$) y el cesio 137 ($Ce137$) son los elementos radiactivos más usados en aplicaciones industriales. Ellos son isótopos artificiales los cuales emiten radiación gamma. El isótopo de cesio es el más usado en aplicaciones industriales para medición de nivel límite, medición de nivel continuo y densidad. Su vida media (30 años) asegura una larga vida de servicio sin requerir reemplazo. Debido a su baja energía (0,622 MeV) no requiere zona de control alrededor del contenedor.

El isótopo de cobalto es usado en aplicaciones de nivel límite donde serían necesarias fuentes de cobalto de gran actividad. Tiene una gran capacidad de penetración aún a grandes distancias o con paredes gruesas del tanque (por ejemplo, aislamiento). Su vida media es de 5,3 años.



7.15.2. Contenedor

La fuente es instalada dentro de un contenedor para asegurar que la radiación de la fuente es emitida solo en la dirección requerida. Los ángulos de incidencia de la radiación normalmente es de 5° para medición límite o 20° y 40° en aplicaciones de nivel continuo.

7.15.3. Unidad electrónica

Recibe los pulsos eléctricos del detector y los procesa para visualizar el nivel y generar una señal eléctrica análoga, normalmente de 4...20 mA. Adicionalmente, algunos transmisores pueden realizar una corrección automática para compensar los errores por disminución de la actividad de la fuente.

Resumen sensores de nivel por radiación

Ventajas

Medición sin contacto con el producto, totalmente externa al silo o tanque.

Insensible al empastamiento del producto, en las paredes del recipiente.

Medición segura, porque la fuente usa bajo nivel de radiación.

Medición en procesos de altas temperaturas y presiones.

Aplicable a todo tipo de líquidos y sólidos.

Desventajas

Requiere aprobación de los organismos locales, para uso y cuidado de material radiactivo.

Costo elevado.

BIBLIOGRAFÍA

- Brumbi, Detlef (1999). Level measurement. CRC Press LLC.
- Considine, Douglas M. (1993). Process Industrial Instruments and Control Handbook. 4 edition, McGraw-Hill Inc.
- D. A., Coggan; C. L., Albert (1996). Fundamentals of industrial controls. 2 edition. Instrument Society of America.
- Devine, Peter (2000). Radar level measurement. Vega controls.
- Milligan, Stephen; Vandelinde, Henry (2006). Understanding ultrasonic level measurement. Siemens Milltronics Process Instruments Inc.
- Omega technologies (1999). Transactions Flow and level measurement. Putman Publishind Company and Omega Press LLC.
- Win van de Kamp (2001). The theory and practice of level measurement. Endress + Hauser.

Capítulo 8

ELEMENTOS FINALES DE CONTROL



Trapiche de caña impulsado por agua, Museo de la Caña de Azúcar, Valle del Cauca, Colombia

8.1. DEFINICIÓN

En general un elemento final de control tiene como propósito manipular la rata de flujo, la masa o energía que produce algún efecto sobre el proceso. Una válvula de control manipula el flujo actuando sobre una restricción variable, dentro de la corriente de flujo.

Aunque los elementos finales de control pueden incluir bombas de velocidad variable, variadores de velocidad, compuertas, elementos eléctricos de calefacción (resistencias), etc., las válvulas de control, son los elementos finales más comunes en las aplicaciones de control. Ellas pueden ocupar más del 80% de las aplicaciones industriales. Por esta razón el enfoque principal sobre los tipos de válvulas y sus características en este capítulo.

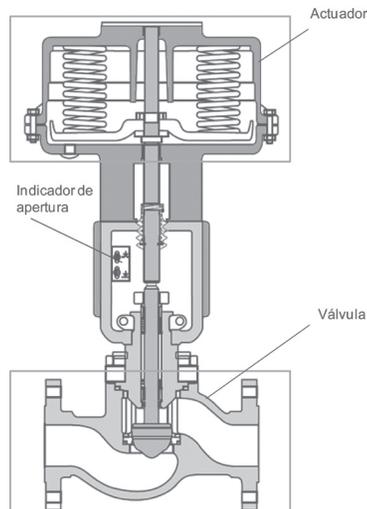
8.1.1. Válvulas de control

Se define como el elemento final que ajusta el tamaño de la restricción, a través del cual pasa el fluido. El tamaño de la restricción se ajusta, dependiendo de la señal recibida del controlador.

Una válvula está compuesta principalmente por dos partes:

1. El cuerpo de la válvula, el cual se instala en la tubería. La conexión puede ser roscada, con bridas o soldada. Los tipos más comunes de cuerpo son: tipo globo, mariposa, bola, diafragma, en ángulo, entre otros.
2. El actuador de la válvula, el cual suministra la fuerza requerida para mover la válvula. El actuador puede ser de tipo: diafragma, eléctrico, electrohidráulico, de doble efecto, manual, etc.

Figura 8-1. Partes de una válvula de control



8.2. GLOSARIO DE TÉRMINOS

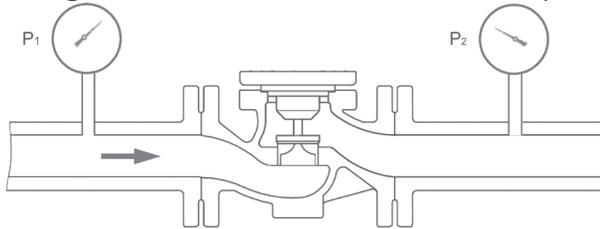
8.2.1. Banda muerta

Es el rango dentro del cual una entrada puede ser variada sin indicar una respuesta observable en la posición de la válvula. Por ejemplo, en una válvula con actuador de diafragma, la banda muerta es la cantidad de presión aplicada al diafragma sin causar movimiento en el vástago de la válvula.

8.2.2. Coeficiente de flujo (CV)

Número de galones por minuto de agua a 60°F que circularán por una válvula con una caída de presión de 1 PSI.

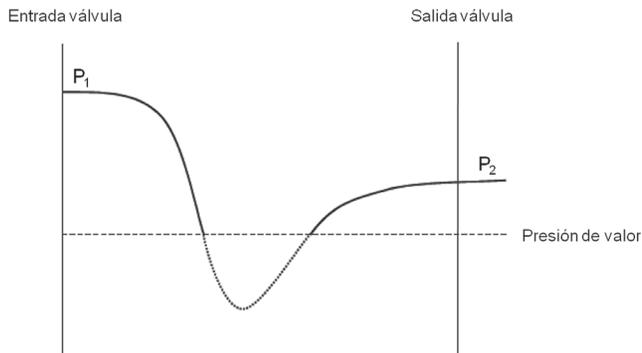
Figura 8-2. Definición de coeficiente de flujo



8.2.3. Cavitación

Fenómeno que ocurre en el flujo de líquidos cuando la presión cae bajo la presión de vapor y luego se recupera por encima de la presión de vapor. Este fenómeno es de dos estados. El primer estado es la formación de burbujas o cavidades dentro del líquido. El segundo estado es el colapso o implosión de estas cavidades dentro de todo el líquido.

Figura 8-3. Representación gráfica de la cavitación



8.2.4. Caída de presión

Es la diferencia entre la presión de entrada y la presión de salida de la válvula.

8.2.5. Vástago de la válvula

Parte usada para conectar la válvula con el actuador.

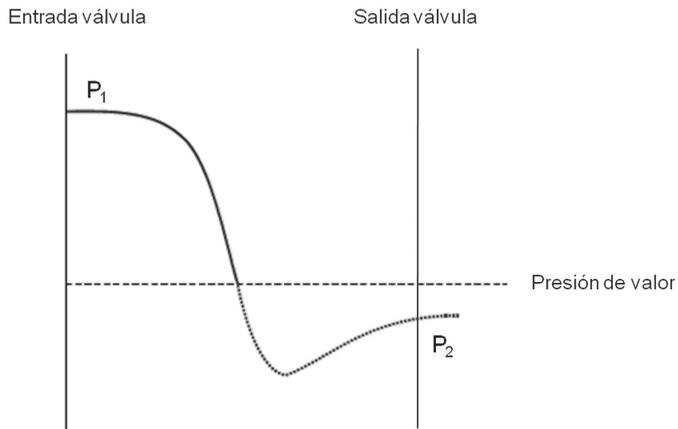
8.2.6. Falla segura (*fail safe*)

Sistema diseñado para abrir, cerrar o mantener en la última posición en fallo de falla del suministro de aire.

8.2.7. Flashing

Fenómeno que ocurre cuando la presión del líquido cae bajo la presión de vapor y no logra recuperarse por encima de la presión de vapor en la salida de la válvula. Esto genera grandes volúmenes de vapor que permanecen en el flujo generando altas velocidades de flujo.

Figura 8-4. Representación gráfica de efecto de flashing



8.2.8. Posicionador

Es el controlador de posición, el cual está mecánicamente conectado a la parte en movimiento del elemento final y automáticamente ajusta la salida de presión del actuador con el fin de mantener la posición deseada en la válvula de acuerdo a la señal de entrada.

8.2.9. Repetibilidad

Máximo cambio en la señal de entrada requerida para causar un cambio en el vástago de la válvula cuando se aproxima en la misma dirección.

8.2.10. Resolución

Es el más pequeño cambio posible que se produce en el vástago de la válvula, que corresponde a un incremento en la señal de entrada.

8.2.11. Velocidad de respuesta

Esta es la función del volumen de aire requerido para producir presión deseada en el diafragma del actuador. Depende de la fricción entre el vástago de la válvula y la carcasa.

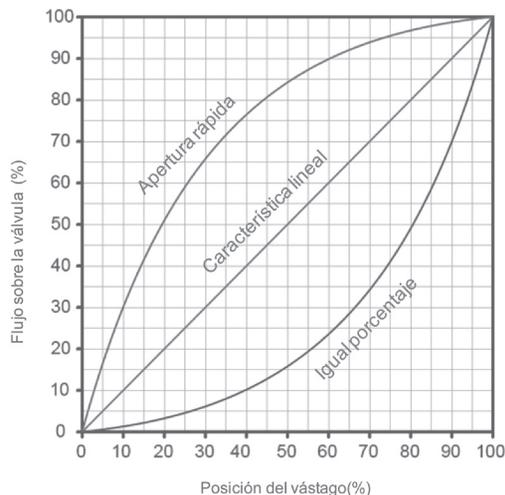
8.2.12. Rango de ajuste (*rangeability*)

Es la relación entre el máximo y el mínimo flujo controlable.

8.2.13. Característica inherente de flujo

Relación entre la rata de flujo a través de una válvula y el desplazamiento del obturador, cuando el obturador es movido desde su posición cerrada, con una pérdida de presión constante. Las válvulas normalmente tienen tres tipos de características: Lineal, apertura rápida e igual porcentaje.

Figura 8-5. Características inherentes de flujo



En la característica de flujo lineal, la relación entre la apertura de la válvula y el flujo con una caída de presión constante, es una línea recta.

En la característica de igual porcentaje, la relación entre flujo y la posición del vástago es exponencial. La principal propiedad de esta característica, es que con cada incremento en el movimiento del vástago de la válvula, se producirá un cambio de igual porcentaje en el flujo, con una caída de presión constante, basado en el flujo antes que se produjera el cambio.

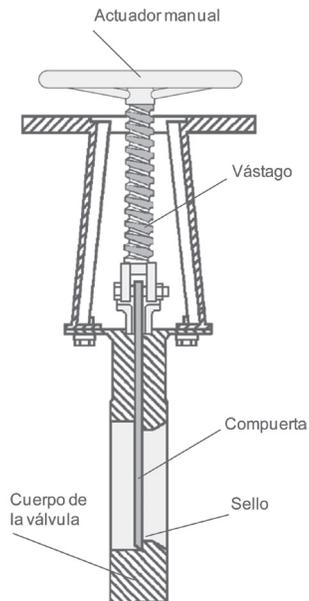
En una válvula con característica de apertura rápida, su comportamiento es aproximadamente lineal hasta el 25% de la apertura del obturador de la válvula partiendo de la posición totalmente cerrada. En este pequeño cambio de posición, se maneja entre un 60 y 70% del flujo total. Este comportamiento es típico de las válvulas mariposa.

8.3. TIPOS DE VÁLVULAS

8.3.1. Válvulas de compuerta

La válvula de compuerta está diseñada con múltiples vueltas para regular el tamaño del orificio por medio de un disco vertical de cara plana que se desliza en ángulos rectos sobre el asiento. Pueden fabricarse en bronce, hierro fundido, monel, acero fundido, acero inoxidable y PVC.

Figura 8-6. Válvula de compuerta



Es recomendada en sitios donde se requiere apertura o cierre total sin estrangulación, aplicaciones de uso poco frecuente y donde se requiera mínima resistencia al flujo.

Resumen válvulas de compuerta

Ventajas

- Alta capacidad.
- Cierre hermético.
- Bajo costo.
- Diseño y funcionamiento sencillo.
- Poca resistencia a la circulación.

Desventajas

- Control deficiente del flujo.
- Se requiere mucha fuerza para accionarla.
- Debe estar abierta o cerrada por completo.
- La posición para estrangulación produce erosión del asiento y el disco.

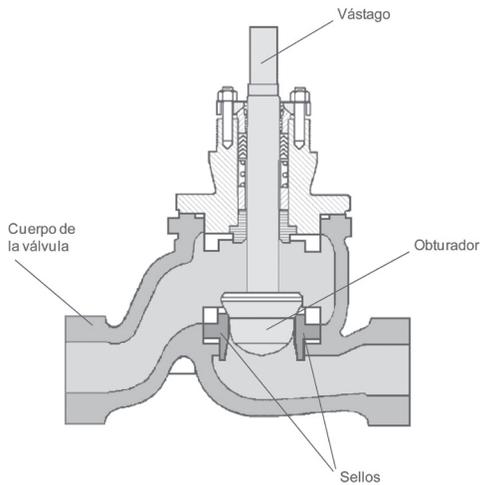
Aplicaciones

Servicio general, aceites, petróleo, gas, aire, líquidos espesos, vapor, gases y líquidos no condensables, líquidos corrosivos.

8.3.2. Válvulas globo

Son las válvulas de uso más común en la actualidad. Sin embargo, al compararla con otros tipos de válvulas, las de tipo globo tienen cierto tipo de limitaciones: Pueden construirse solo hasta 16", menor capacidad comparada con una válvula de bola o de mariposa y mayor costo especialmente en tamaños grandes.

Figura 8-7. Válvula globo



Están divididas en varios tipos tales como de asiento sencillo, de asiento doble, de tres vías, de ángulo, tipo Y, entre otras. Son fabricadas en bronce, hierro fundido, acero al carbono, acero inoxidable y otras aleaciones de acero. Son fabricadas para tuberías desde 1/2" hasta 16".

Resumen válvulas de globo

Ventajas

- Es la mejor válvula de control para cualquier variable.
- Control preciso del flujo.
- Diseñada para trabajo pesado.

Desventajas

- Alto costo.
- Requiere mantenimiento frecuente.
- Alta caída de presión.

Aplicaciones

- Líquidos, vapor y gases corrosivos.

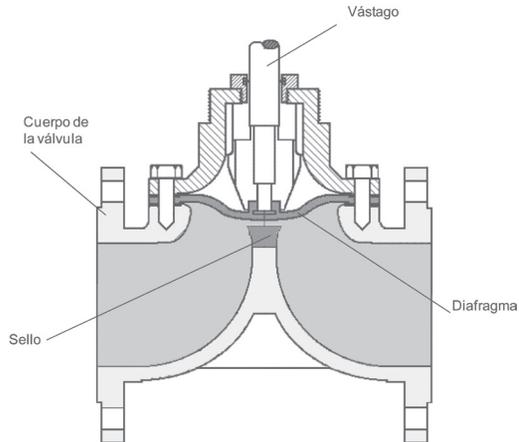
Características de flujo

- Lineal, igual porcentaje y apertura rápida.

8.3.3. Válvulas de diafragma

Realiza el cierre por medio de un diafragma flexible, unido a un elemento de compresión unido al vástago de la válvula. Cuando el vástago hace descender el elemento compresión, el diafragma produce sello y limita el paso del fluido. Tienen características de flujo lineal.

Figura 8-8. Válvula de diafragma



Este tipo de válvulas es excelente para aplicaciones donde se deben controlar flujo de lodo o fluidos viscosos.

A pesar de su alta capacidad de flujo, su funcionamiento en aplicaciones de control es limitado, debido a su bajo rango de ajuste por su característica inherente de flujo (apertura rápida). Por esta razón siempre requiere el uso de posicionador.

Resumen válvulas de diafragma

Ventajas
Manejo de productos corrosivos y abrasivos.
Costo relativamente bajo.
No hay posibilidad de fugas por el vástago.
Desventajas
Mala para control (ON-OFF).
Mala para manejar altas presiones.
El diafragma es susceptible de desgaste.
Aplicaciones
Fluidos corrosivos, materiales pegajosos o viscosos, lodos, líquidos con fibras, alimentos y productos farmacéuticos.
Características de flujo
Lineal.

8.3.4. Válvulas mariposa

La válvula mariposa está conformada por un disco soportado en un eje, que es capaz de rotar dentro de un cuerpo cilíndrico. Las válvulas mariposa tienen una gran capacidad de flujo, que le permite reemplazar válvulas globo en grandes diámetros.

Figura 8-9. Válvula mariposa

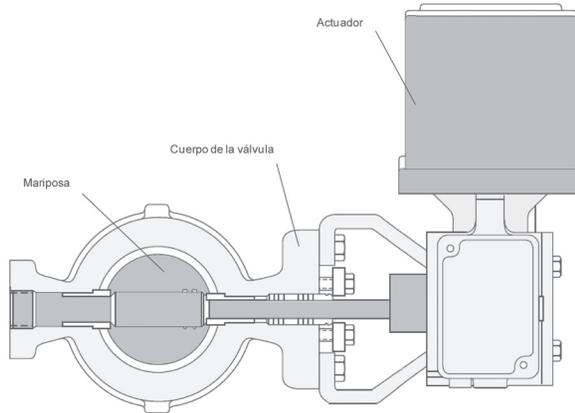


Figura 8-9 Válvula mariposa

Pueden ser construidas desde 2" hasta 150" en materiales como acero inoxidable, acero al carbón, bronce, monel y los discos en todos los metales recubiertos de elastómeros como Kynar, neopreno, teflón, entre otros.

Resumen válvulas mariposa

Ventajas

- Manejo de grandes caudales.
- Bajo costo.

Desventajas

- Solo para aplicaciones de bajas presiones.
- Mala reductora de presión.

Aplicaciones

- Líquidos limpios y con sólidos en suspensión y gases con grandes volúmenes.

Características de flujo

- Igual porcentaje.

8.3.5. Válvulas de bola

En una válvula de bola el cierre se logra por medio de un disco o tapón que cierra o limita el paso del fluido en un asiento que suele estar en paralelo con la tubería.

Figura 8-10. Válvula de bola

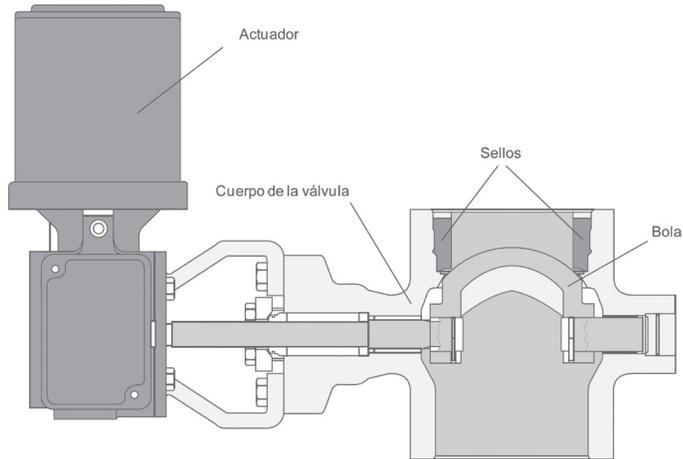


Figura 8-10 Válvula de bola

Pueden construirse desde 1" hasta 42" en materiales como acero al carbón, acero inoxidable, bronce, latón titanio, tantalio, polipropileno y PVC.

Resumen válvulas de bola

Ventajas

- Excelente para manejar productos pastosos (pulpa de papel).
- Manejo de grandes volúmenes.
- Relativo bajo costo.

Desventajas

- Mantenimiento difícil.
- Mala reductora de presión.

Aplicaciones

- Aplicaciones líquidos, vapores, gases y fluidos corrosivos.

Características de flujo

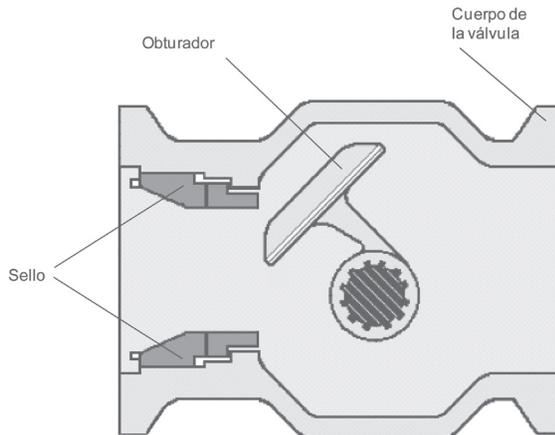
- Igual porcentaje.

8.3.6. Válvulas rotativa excéntrica

Un cuerpo esférico segmentado montado de forma excéntrica, rota 50 grados dentro de un sello de anillo instalado en el cuerpo de la válvula. Este tipo de válvula puede manejar fluidos con altas temperaturas hasta 540°C.

Pueden construirse desde 1" a 6" en acero al carbón, acero inoxidable y otras aleaciones.

Figura 8-11. Válvula rotativa excéntrica



Resumen válvulas rotativa excéntrica

Ventajas

- Alta capacidad comparada con la de tipo globo.
- Maneja más altas presiones que la válvula mariposa.
- Alto factor de recuperación de presión.

Desventajas

- El fluido del proceso debe ser relativamente limpio, esto la limita para aplicaciones de líquido con fibras como es el caso de la pulpa de papel.

Aplicaciones

- Líquidos, vapores y gases.

Características de flujo

- Igual porcentaje.

8.4. ACTUADORES

Un actuador convierte la señal de control suministrada por el elemento de control (controlador) en un movimiento lineal o rotativo para ajustar el vástago de la válvula a la posición deseada.

Estos son los elementos que distinguen una simple válvula de paso de una válvula de control. Los actuadores están disponibles en diferentes diseños dependiendo de su capacidad y la fuente de energía.

Los siguientes parámetros deben ser tenidos en cuenta para su selección:

1. Fuente de energía

La fuente de energía disponible normalmente es un factor que determina directamente la selección del tipo de actuador. Típicamente los actuadores pueden ser alimentados con aire o electricidad. Sin embargo, en algunos casos pueden ser usados otros fluidos como agua, fluido hidráulico, vapor o la presión del fluido contenido en la tubería donde la válvula se va a instalar.

2. Condición en caso de falla

Muchos lazos de control requieren una acción específica de la válvula en caso de falla de la fuente de alimentación. La acción deseada en caso de falla es requerida por razones de seguridad para la protección del equipo de proceso. Los actuadores están diseñados para que en caso de falla permanezcan abiertos (*fail to open*), cerrados (*fail to close*) o en retención de la última posición (*holding*).

3. Capacidad del actuador

El actuador debe tener la suficiente potencia o torque para poder mover la válvula. En algunos casos este requisito puede determinar el tipo de actuador y los requerimientos de la fuente de alimentación. En principio se puede decir que las válvulas de gran tamaño están limitadas a actuadores eléctricos o electro-hidráulicos debido a que los actuadores neumáticos no tienen suficiente capacidad de torque. En caso contrario de aplicaciones de válvulas de tamaño pequeño los actuadores neumáticos son los más adecuados.

4. Costo

La evaluación económica para la selección del actuador, involucra no solamente el costo inicial sino también el mantenimiento y otros factores de desempeño. Un actuador simple de diafragma tiene pocas partes en movimiento, es fácil de reparar y normalmente no presenta muchos problemas. Su costo inicial también es bajo. Debido a su diseño, es fácil entender su funcionamiento por parte del personal de mantenimiento.

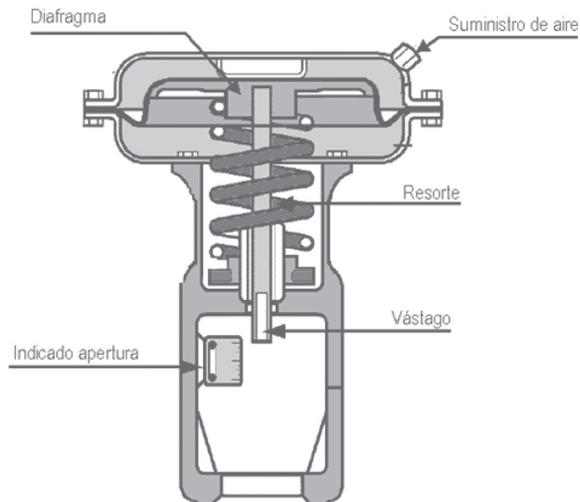
8.5. TIPOS DE ACTUADORES

8.5.1. Actuador de diafragma

Los actuadores neumáticos pueden ser de tipo diafragma o de pistón pero el actuador de diafragma es el más común. Los actuadores de diafragma trabajan con presiones de 3 a 15 PSI o 6 a 30 PSI y pueden ser de acción directa o inversa.

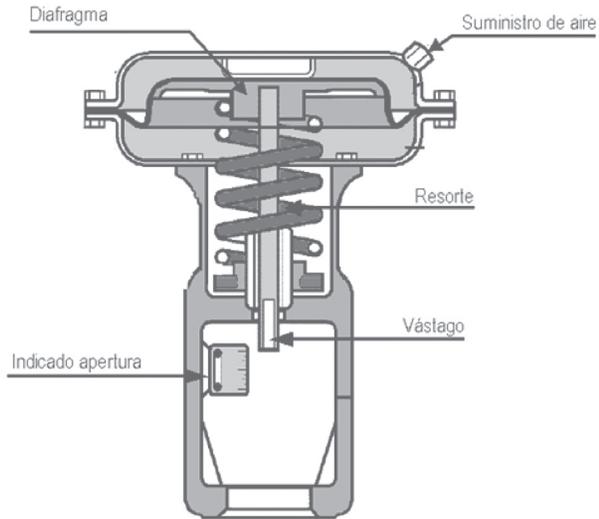
Un actuador de acción directa está diseñado para que cuando incrementa la presión de aire en la parte superior del diafragma mueva el vástago hacia abajo cerrando la válvula. Este tipo de actuador es definido como de aire para cerrar o en falla abierta porque cuando hay falla en el suministro de presión el resorte del diafragma permite que la válvula abra.

Figura 8-12. Actuador de diafragma aire para cerrar



Con un actuador de acción inversa, la presión del aire se conecta en la parte baja del diafragma y mueve el vástago hacia arriba en sentido opuesto al resorte. Esta acción es llamada aire para abrir o en falla cerrada.

Figura 8-13. Actuador de diafragma aire para abrir



Resumen actuador de diafragma

Ventajas

- Bajo costo.
- Simple.
- Puede definirse la acción en caso de falla.
- Se requiere baja presión de suministro.
- Fácil mantenimiento.

Desventajas

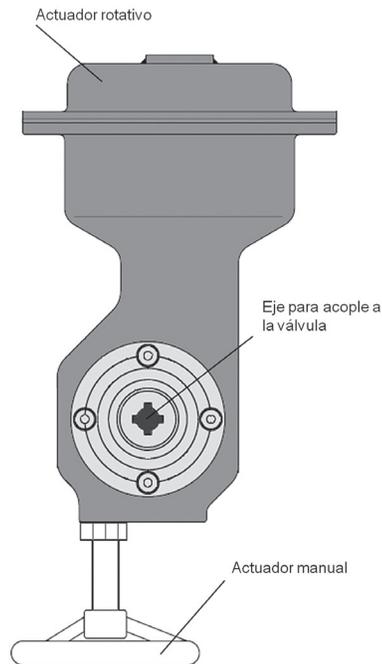
- Capacidad de salida limitada.
- Gran tamaño y peso.

8.5.2. Actuador de pistón

El actuador de pistón es usado en aplicaciones de alta presión o procesos donde se requiera manejar alta presión diferencial en la válvula. Son generalmente más compactos que los actuadores de diafragma y proveen mayor torque. Los actuadores de pistón normalmente trabajan con presiones entre 50 y 150 PSI.

El actuador de pistón es una excelente elección cuando se requiere una unidad compacta de alta potencia. Son fácilmente ajustables a procesos de alta temperatura.

Figura 8-14. Actuador de pistón



Resumen actuador de diafragma

Ventajas

- Alta capacidad de torque.
- Compacto.
- Liviano.
- Adaptable a altas temperaturas.
- Alta velocidad de respuesta.

Desventajas

- Para condición de falla requiere elementos adicionales.
- Requiere alta presión de suministro.

8.5.3. Actuador eléctrico

Un actuador eléctrico normalmente consiste en un motor y un conjunto de engranajes. Están disponibles en un amplio rango de torque y capacidades de salida. Están diseñados para montaje remoto donde no se tiene disponible otra fuente de energía.

Figura 8-15. Actuador eléctrico



Resumen actuador eléctrico

Ventajas

- Compactos.
- Alta capacidad de salida.
- Puede ser usado en plantas con alta polución o en sitios con mala calidad de aire.

Desventajas

- Alto costo.
- Ciclo de vida limitado.
- No se puede seleccionar la acción de control.
- Carrera lenta.

BIBLIOGRAFÍA

- ANSI/ISA S075.05-1986. *Control Valves Terminology*. Instrument Society of America.
- C. L., Albert; D. A., Coggan (1992). *Fundamentals of Industrial Controls*. Instrument Society of America.
- Considine, Douglas M. (1993). *Process Industrial Instruments and Control Handbook*. 4^a edition. McGraw-Hill Inc.
- Smith, Carlos A.; Corripio, Armando B. (1991). *Control Automático de Procesos*. Editorial Limusa S.A.
2005. *Control Valves Handbook*. Fisher Controls International LLC.
2000. *Masoneilan Control Valve Sizing Handbook*. Dresser Industries Inc.