

TUTORIAL DE INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

ROSEMARY HERRERA MERCADO

LEONARDO FABIO ARIAS MONTES

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE ING. ELECTRICA ELECTRÓNICA Y MECATRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS
NOVIEMBRE 2003

TABLA DE CONTENIDO

<u>TABLA DE CONTENIDO.....</u>	<u>1</u>
<u>INTRODUCCIÓN.....</u>	<u>12</u>
<u>1. CARACTERÍSTICAS DE LA INSTRUMENTACIÓN</u>	<u>14</u>
<u>2. CONCEPTOS BASICOS</u>	<u>15</u>
2.1 VARIABLES.....	15
2.2 PROCESO	15
2.3 ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN Y MEDICION.....	15
2.4 SEÑALES	16
2.5 SISTEMAS	16
2.6 PERTURBACION.....	16
2.7 SISTEMAS DE CONTROL DE PROCESOS.....	16
2.8 SISTEMAS DE CONTROL DE BUCLE O LAZO CERRADO	17
2.9 SISTEMAS DE CONTROL DE BUCLE O LAZO ABIERTO	17
<u>3. CONCEPTOS DE INSTRUMENTACIÓN.....</u>	<u>18</u>
3.1 DEFINICIÓN DE INSTRUMENTO DE MEDICION	18
3.2 CLASES DE INSTRUMENTOS	18
3.2.1 EN FUNCIÓN DEL INSTRUMENTO	18
3.2.1.1 Instrumentos Ciegos	18
3.2.1.2 Instrumentos Indicadores	19
3.2.1.3 Instrumentos Registradores	19
3.2.1.4 Elementos Primarios de Medida	19
3.2.1.5 Instrumentos Transmisores.....	19
3.2.1.6 Elementos Convertidores	20
3.2.1.7 Elemento Final de Control o Actuador	20
3.2.1.8 Elemento Accionador de Señales	20
3.2.1.9 Elemento Procesador de Señales.....	21
3.2.2 EN FUNCION DE LA VARIABLE DE PROCESO	21
<u>4. TERMINOLOGÍA DE LA INSTRUMENTACIÓN.....</u>	<u>22</u>
4.1 RANGO (RANGE).....	22
4.2 ALCANCE O SPAN	22

4.3 ERROR	23
4.4 PRECISION.....	23
4.5 SENSIBILIDAD	23
4.6 RESOLUCIÓN	23
4.7 HISTERESIS (HYSTERESIS).....	23
4.8 LINEALIDAD (LINEARITY)	24
4.9 TRAZABILIDAD.....	24
4.10 TIEMPO DE RESPUESTA (REPOSE TIME)	24
4.11 EXACTITUD (ACCURACY).....	25
4.12 RANGO DE EXACTITUD.....	25
4.13 COEFICIENTE DE TEMPERATURA.....	25
4.14 BANDA MUERTA	25
4.15 TIEMPO MUERTO	26
4.16 REPETIBILIDAD (REPEATABILITY).....	26
4.17 RANGO DE AJUSTE.....	26
4.18 TURNDOWN	27
4.19 ESTABILIDAD	27
4.20 FIABILIDAD	27
4.21 RUIDO	28
4.22 REPRODUCTIBILIDAD (REPRODUCIBILITY).....	28
4.23 FLUCTUACIÓN (DRIFT).....	28
<u>5. ERROR</u>	<u>29</u>
5.1 ERROR ESTATICO	30
5.2 ERROR DINAMICO	30
5.3 ERROR DE CALIBRACIÓN	30
5.3.1 ERROR DE CERO.....	30
5.3.2 ERROR DE MULTIPLICACIÓN	31
5.3.3 ERROR DE ANGULARIDAD	32
5.3.4 ERROR DE PARALELAJE	32
<u>6. SIMBOLOGIA DE LA INSTRUMENTACIÓN</u>	<u>33</u>
6.1 ESQUEMAS DE BLOQUES	33
6.2 TAG NUMBER	34
6.3 LETRAS DE IDENTIFICACIÓN.....	35
6.4 LINEAS DE TRANSMISIÓN	36
6.5 SIMBOLOGIA ISA S5-1.....	36
6.6 SIMBOLOGIA DE VÁLVULAS.....	38
6.7 EQUIPOS DE PROCESO	39
6.8 SÍMBOLOS DE PROCESAMIENTO AUTOMATICO DE SEÑAL	41
<u>7. ELEMENTOS PRIMARIOS.....</u>	<u>42</u>
7.1 SENSORES DE TEMPERATURA.....	43

7.1.1 TERMOCUPLAS.....	44
7.1.2 LA RTD.....	48
7.1.3 EL TERMISTOR.....	53
7.1.4 SENSOR DE TEMPERATURA LINEAL MONOLÍTICO.....	54
7.2 SENSORES DE PRESION	56
7.2.1 BOURDON.....	56
7.2.2 FUELLE.....	57
7.2.3 DIAFRAGMA.....	57
7.2.4 CAPACITIVO O INDUCTIVO.....	58
7.2.5 RESISTIVO, CELDA DE CARGA (STRAIN GAUGE).....	58
7.2.6 PIEZOELÉCTRICO.....	59
7.3 SENSORES DE FLUJO.....	60
7.3.1 MEDIDOR DE PLACA ORIFICIO.....	63
7.3.2 TUBO VENTURI.....	64
7.3.3 TOBERAS.....	65
7.3.4 TUBO PITOT.....	65
7.3.5 ROTAMETROS.....	66
7.3.6 MEDIDORES DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO.....	67
7.3.6.1 Medidor de Disco Oscilante:.....	68
7.3.6.2 Medidor de Piston Oscilante.....	68
7.3.6.3 Medidor de Engranajes Ovais.....	69
7.3.7 Medidores de Velocidad.....	69
7.3.8 Medidores de Turbina.....	70
7.3.9 Medidor de Torbellino o Vortex.....	71
7.3.10 Medidores Electromagnéticos.....	71
7.3.11 Medidores Ultrasonicos de Flujo.....	72
7.3.12 Medidores de Flujo Másico.....	74
7.3.13 MEDIDOR DE FLUJO DE MASA ELECTRÓNICO.....	76
7.4 SENSORES DE NIVEL.....	78
7.4.1 INTERRUPTOR FLOTANTE.....	79
7.4.2 SENSORES ULTRASÓNICOS SIN CONTACTO.....	80
7.4.3 SENSORES CAPACITIVOS.....	80
7.4.4 SENSOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL.....	81
7.5 SENSORES DE ANÁLISIS.....	83
7.5.1 DENSIDAD.....	87
7.5.1.1 Areómetros.....	88
7.5.1.2 Métodos de Presión Diferencial.....	88
7.5.1.3 Metodo de Desplazamiento.....	88
7.5.1.4 Refractómetro.....	88
7.5.1.5 Método de Radiación.....	89
7.5.1.6 Método de Punto de Ebullición.....	89
7.5.1.7 Medidores Inerciales.....	89
7.5.2 Viscosidad.....	90
<u>8. INSTRUMENTOS INDICADORES.....</u>	<u>92</u>
8.1 INDICADORES DE PRESIÓN.....	92
8.2 INDICADOR DE PRESION DIFERENCIAL.....	93

8.4 INDICADORES DE NIVEL.....	95
<u>9. INSTRUMENTOS TRANSMISORES.....</u>	<u>98</u>
9.1 TRANSMISORES NEUMÁTICOS	98
9.2 TRANSMISORES ELECTRÓNICOS	100
9.3 TRANSMISORES DIGITALES	100
<u>10. ELEMENTOS FINALES DE CONTROL.....</u>	<u>107</u>
10.1 VÁLVULAS DE CONTROL	107
10.1.1 CUERPOS DE VÁLVULAS	109
10.1.2 TAPA DE LA VÁLVULA.....	109
10.1.3 PARTES INTERNAS	110
10.1.4 CARACTERÍSTICAS DE CAUDAL EFECTIVAS.....	110
10.1.5 SERVOMOTORES.....	110
10.1.6 SERVOMOTORES NEUMÁTICOS.....	112
10.1.7 CARACTERÍSTICAS DE FLUJO EN LAS VÁLVULAS	112
10.2 ESPECIFICACIONES DE VÁLVULAS.....	113
10.3 DIMENSIONAMIENTO DE VÁLVULAS	114
10.4 EQUIPOS ADICIONALES DE LA VÁLVULA DE CONTROL.....	115
10.5 PARÁMETROS	117
10.6 ACCIONES DE LA VÁLVULA.....	119
10.6.1 DIRECTA.....	119
10.6.2 INVERSA	119
10.7 RUIDO	121
10.8 TIPOS DE VÁLVULAS	121
10.8.1 MOVIMIENTO LINEAL.....	122
10.8.2 MOVIMIENTO CIRCULAR.....	125
10.9 CRITERIOS DE SELECCIÓN	129
<u>11. CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS</u>	<u>131</u>
11.1 CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE TEMPERATURA	131
11.1.1 BAÑO DE TEMPERATURAS	131
11.1.2 HORNOS DE TEMPERATURA.....	131
11.1.3 COMPROBADORES POTENCIOMETRICOS	132
11.2 CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE PRESION	132
11.3 CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE FLUJO.....	134
11.4 CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE NIVEL	135
11.5 MANTENIMIENTO Y CALIBRACIÓN DE VÁLVULAS	136
<u>12. MONTAJE DE INSTRUMENTACIÓN.....</u>	<u>137</u>
12.1 MONTAJE DE INSTRUMENTOS INDICADORES	137

12.2 MONTAJE DE INSTRUMENTOS TRANSMISORES	138
12.3 MONTAJE DE INSTRUMENTOS CONTROLADORES	139
12.4 MONTAJE DE ELEMENTOS FINALES DE CONTROL	140
<u>13. TIPIOS DE MONTAJE.....</u>	<u>141</u>
13.1 TRANSMISORES FLUJO.....	141
13.2 TRANSMISORES DE NIVEL.....	144
13.3 TRANSMISORES DE PRESION	146
13.4 TRANSMISORES DE TEMPERATURA	150
13.5 VÁLVULAS DE CONTROL	151
<u>14. PRUEBA DE LAZO</u>	<u>153</u>
<u>15. CONCLUSIONES</u>	<u>155</u>
<u>16. BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>156</u>

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Curva de histéresis	18
Figura 2. Curva de rango de ajuste	26
Figura 3. Curva de error de cero	30
Figura 4. Curva de error de multiplicación	30
Figura 5. Curva de error de angularidad	31
Figura 6. Curva de error de paralelaje	31
Figura 7. Diagrama de proceso	32
Figura 8. Letras de identificación	33
Figura 9. Significado de letras de identificación	34
Figura 10. Líneas de transmisión	35
Figura 11. Simbología ISA S5-1	36
Figura 12. Simbología de Válvulas	37
Figura 13. Equipos de proceso	38
Figura 14. Símbolos de procesamiento automático	40
Figura 15. Efecto Seebeck	43
Figura 16. Voltaje Seebeck	43
Figura 17. Tipos de termocuplas y sus características más importantes	44
Figura 18. Temperatura de termocuplas vs voltaje	45
Figura 19. Efecto de la resistencia de los cables	49
Figura 20. Puente de Wheastone	49
Figura 21. Extensión de la RTD	49
Figura 22. Puente de tres cables	50
Figura 23. Puente de Wheastone	50
Figura 24. Medida de resistencia con cuatro cables	51
Figura 25. Diferencias entre RTDS	52
Figura 26. Comparación de la sensibilidad de los sensores de temperatura	52

Figura 27. Sensor de corriente	54
Figura 28. Sensor de voltaje	54
Figura 29. Comparación de los diferentes sensores de temperatura	54
Figura 30. Diseños de tubo Bourdon	55
Figura 31. Sensor de fuelle	56
Figura 32. Sensores de diafragma	56
Figura 33. Sensores capacitivos	57
Figura 34. Sensores resistivos	58
Figura 35. Sensor piezoeléctrico	58
Figura 36. Tipos de flujo	60
Figura 37. Medidores de placa orificio	62
Figura 38. Placa orificio con tomas en la vena contracta o en los flanges	62
Figura 39. Tubo Venturi	63
Figura 40. Medidor de flujo tipo Tobera	64
Figura 41. Tubo Pitot	65
Figura 42. Medidor de flujo de área variable (rotámetro)	66
Figura 43. Medidor de disco oscilante	67
Figura 44. Medidor de pistón oscilante	68
Figura 45. Medidor de engranajes ovals	68
Figura 46. Medidor de turbina	69
Figura 47. Medidor de torbellino (Vortex)	70
Figura 48. Medidor electromagnético de flujo	71
Figura 49. Medidor ultrasónico de efecto Doppler	72
Figura 50. Medidor de flujo ultrasónico de tiempo de tránsito	72
Figura 51. Diseños de los medidores de Coriolis	73
Figura 52. Efecto Coriolis	74
Figura 53. Deflexión del tubo sometido a la vibración y a la fuerza del fluido en el medidor de Coriolis de dos tubo y en el de tubo recto	75
Figura 54. Interruptor flotante	78
Figura 55. Sensor ultrasónico sin contacto	79

Figura 56. Sensores de nivel capacitivos	80
Figura 57. Sensor de nivel de presión diferencial	81
Figura 58. Sensor de nivel de presión diferencial	81
Figura 59. Sensor de nivel	82
Figura 60. Sistema Típico de muestreo para un analizador en línea	84
Figura 61. Manómetro (PI)	91
Figura 62. Manómetro de sello.	91
Figura 63. Constitución de un manómetro de sello	92
Figura 64. Indicador de presión diferencial	92
Figura 65. Constitución de un indicador de presión diferencial	93
Figura 66. Indicador de temperatura	93
Figura 67. Indicador de temperatura	94
Figura 68. Constitución de un indicador de temperatura	94
Figura 69. Indicador de nivel	95
Figura 70. Indicador de nivel de fluido	95
Figura 71. Indicador de nivel de flotador	95
Figura 72. Indicadores de nivel	96
Figura 73. Constitución de un Transmisor neumático	97
Figura 74. Transmisores de equilibrio de movimiento	98
Figura 75. Transmisor de nivel de capilar	98
Figura 76. Transmisor de temperatura	99
Figura 77. Constitución de transmisores digitales	101
Figura 78. Constitución de un transmisor de presión	102
Figura 79. Constitución de alarma	103
Figura 80. Conexión para comunicación (4 a 20 mA cc)	103
Figura 81. Transmisor de Baja potencia	104
Figura 82. Equipo para calibración	104
Figura 83. Equipo de calibración	105
Figura 84. Comparación de transmisores	105
Figura 85. Configuración de válvula de control	107

Figura 86. Diafragma representativo de una válvula	108
Figura 87. Servomotores eléctricos	110
Figura 88. Gráficas de flujos de válvulas	112
Figura 89. Acciones de la válvula	119
Figura 90. Acciones de la válvula	120
Figura 91. Tipos de válvulas	122
Figura 92. Tipos de válvula	123
Figura 93. Tipos de válvulas	124
Figura 94. Tipos de válvulas	125
Figura 95. Tipos de válvulas	127
Figura 96. Válvula mariposa	128
Figura 97. Montaje de transmisores de flujo	140
Figura 98. Transmisor de flujo de presión diferencial para gas	141
Figura 99. Transmisión de presión diferencial para vapor	141
Figura 100. Descripción	142
Figura 101. Transmisor de flujo de presión diferencial para liquido	142
Figura 102. Descripción	143
Figura 103. Montaje de transmisor de nivel presión diferencial	143
Figura 104. Descripción	144
Figura 105. Transmisor de nivel tipo desplazador	144
Figura 106. Transmisor de presión con pote inferior	145
Figura 107. Descripción	145
Figura 108. Transmisor con purga de aire	146
Figura 109. Descripción	146
Figura 110. Transmisor de presión para líquidos	147
Figura 111. Descripción	147
Figura 112. Transmisor de presión para vapor	148
Figura 113. Descripción	148
Figura 114. Transmisor de temperatura con termopozo	149
Figura 115. Descripción	149

Figura 116. Montaje de válvula de control	150
Figura 117. Descripción	150
Figura 118. Válvula con posicionador	151
Figura 119. Descripción	151
Figura 120. Plano diagrama de lazos	152

INTRODUCCIÓN

Dentro de los instrumentos esenciales en la instrumentación industrial están los sensores que miden las condiciones del proceso y las válvulas que influyen en las operaciones de dicho proceso. Para que un proceso sea exitoso se requiere una instrumentación apropiada, los ingenieros deben entender los principios de los instrumentos más comunes utilizados en la industria

Un consejo que se le puede dar a los estudiantes es que supongan que los instrumentos siempre son incorrectos, esta afirmación no busca socavar la razonable confianza que se debe tener en las aplicaciones de sensores y válvulas. Sin embargo, los nuevos ingenieros a veces tienden a aceptar los instrumentos como exactamente correctos sin evaluar los errores probables asociados con su uso. Dependiendo del instrumento, de las condiciones de operación del proceso y la aplicación, los errores del instrumento pueden ser tan pequeños como para considerarlos insignificantes o pueden ser tan grandes como para degradar seriamente el funcionamiento del control; el ingeniero debe investigar cada aplicación durante el proceso de diseño y debe seleccionar el instrumento apropiado.

Ocasionalmente pueden ocurrir errores muy grandes en la práctica debido a la falta de calibración y al funcionamiento defectuoso del instrumento. Los efectos de errores lentos y pequeños del sensor pueden evitarse mediante un programa de mantenimiento rutinario. Como los efectos graves de funcionamiento defectuoso grave del instrumento pueden ser sumamente dañinos, los diseños de control deben usar instrumentos extras (redundantes) para proporcionar verificaciones.

El material en este documento es una recopilación de muchas fuentes de dominio público, y proporciona una buena introducción a los principios de la

instrumentación. Sin embargo, muchos sensores que podrían considerarse importantes no se discuten aquí. Por consiguiente, los lectores deben recoger la información usada para especificar, instalar, y mantener el equipo industrial a partir de fuentes fiables y modernas, como: laboratorios de pruebas, manuales de ingeniería, organizaciones profesionales e industriales, y proveedores de equipo.

1. CARACTERÍSTICAS DE LA INSTRUMENTACIÓN

Para solucionar los problemas en la medida de variables dentro de un proceso es necesario tener un modelo conceptual de los procesos de medición. Un instrumento, es en general un dispositivo que transforma una variable física de interés en una forma más conveniente para una aplicación futura.

El elemento funcional dentro de los modelos de la instrumentación es el sensor, el cual convierte una variable física de entrada en una señal de salida. Estas señales tienen la propiedad de que pueden ser manipuladas dentro de la transmisión de un sistema así como en un circuito eléctrico o mecánico.

Las señales variables pueden ser transmitidas a la salida del proceso, a un instrumento que despliegue su valor donde puede ser leída y observada por un operador, o llevada a un dispositivo remoto donde se pueden guardar o utilizar para otra aplicación (sirven como señales de entrada a otros sistemas); en los circuitos eléctricos el voltaje es la variable más utilizada, al igual que la fuerza y el desplazamiento lo son para los circuitos mecánicos.

En la mayoría de los casos la señal de salida de los sensores es muy pequeña y requiere de ser amplificada para su aplicación. En otros casos se necesita una señal digital y como la salida en la mayoría de los sensores es análoga se requiere de un convertidor de señales que adecue la señal captada para que así pueda ser utilizada. Los sensores pueden ser clasificados de dos maneras, sensores activos y sensores pasivos. Los sensores pasivos son los que no agregan energía al proceso pero toman parte de ella para realizar la medida (termocuplas, rtd, etc.). Los sensores activos son los que agregan energía al proceso para poder realizar la medición.

2. CONCEPTOS BÁSICOS

2.1 VARIABLES

Es cualquier elemento que posee características dinámicas, estáticas, químicas y físicas bajo ciertas condiciones, que constantemente se pueden medir. Tradicionalmente las variables que se miden y controlan dentro de un proceso son cuatro: presión, temperatura, nivel y flujo, dichas variables están vinculadas a las condiciones operativas del proceso.

Existen también dentro de los procesos industriales otras características físicas y químicas que también se mide y se controlan tale como; densidad, viscosidad, composición, pH, etc.

2.2 PROCESO

Es un desarrollo que se realiza por un conjunto de elementos cada uno con ciertas funciones que gradual y progresivamente producen un resultado final.

2.3 ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN Y MEDICIÓN

Son los dispositivos que se encargan de transformar la variable del proceso en una señal mecánica, eléctrica, neumática, etc., la cual puede ser utilizada por otros instrumentos, estos dispositivos tienen dos partes, que son:

- Elemento primario: es el que capta la variable a medir y produce cambios en las propiedades físicas que luego pueden transformarse en una señal.
- Elemento secundario: es el que capta la señal producida por el elemento primario y la transforma en una señal o genera una señal estandarizada que puede ser captada por otro instrumento en forma local o remota.

2.4 SEÑALES

Eventos físicos cuya variación en el tiempo o magnitud contiene información.

2.5 SISTEMAS

Es una combinación de componentes que actúan conjuntamente y cumplen un objetivo.

2.6 PERTURBACION

Señal que afecta la respuesta real del sistema produciendo un error en la medida, ejemplo los campos magnéticos, la inductancia etc. según la sensibilidad individual.

2.7 SISTEMAS DE CONTROL DE PROCESOS

Es un sistema de regulación automática que determina la respuesta de la variable en función de virtudes programadas para el sistema.

2.8 SISTEMAS DE CONTROL DE BUCLE O LAZO CERRADO

Es el sistema de control retroalimentado, donde la señal pasa por el controlador es comparada y reenviada para establecer el parámetro esperado (Set Point).

2.9 SISTEMAS DE CONTROL DE BUCLE O LAZO ABIERTO

Es el sistema donde la salida no tiene efecto sobre la acción de control, no hay comparación entre el valor medido en la salida respecto a la entrada, es el camino que sigue la señal sin retroalimentación. Por ejemplo las instalaciones de bombillos de navidad se encienden unas y las otras se apagan, todo es controlado en función del tiempo sin importar que tanto alumbren los bombillos.

3. CONCEPTOS DE INSTRUMENTACIÓN

3.1 DEFINICIÓN DE INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

Un instrumento es un dispositivo que se encarga de interpretar señales proporcionales a la magnitud de la variable.

3.2 CLASES DE INSTRUMENTOS

Los instrumentos de medición¹ y de control son relativamente complejos y su funcionamiento puede comprenderse bien si están incluidos dentro de una clasificación adecuada. Como es lógico, pueden existir varias formas para clasificar los instrumentos, cada una de ellas con sus propias ventajas y limitaciones. Se consideraran dos clasificaciones básicas: la primera relacionada con la función del instrumento y la segunda con la variable del proceso.

3.2.1 En función del instrumento

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

¹ Ver carpeta de instrumentación en CD (PDF instru_industrial)

3.2.1.2 Instrumentos indicadores. Son los instrumentos que poseen una escala para expresar la equivalencia de los datos al operario, pueden ser manómetros, tensómetros, entre otros. Pueden ser concéntricos, excéntricos y digitales.

3.2.1.3 Instrumentos registradores. Son aquellos que expresan la señal con trazos continuos o con puntos y Pueden ser circulares o de gráficos rectangular o alargado según sea la forma del grafico.

- Grafico Circular: Suelen tener el grafico de 1 revolución en 24 horas.
- Grafico rectangular: La velocidad normal del grafico es de unos 20mm/hora.

3.2.1.4 Elementos primarios de medida. Los elementos primarios o sensores están en contacto con la variable de proceso y utilizan o absorben energía del medio controlado para dar al sistema de medición una indicación en respuesta a la variación de la variable controlada.

La salida generada depende de alguna manera de la variable a medir. Ejemplos: El termopar, donde la fem en milivoltios depende de la temperatura; la placa de orificio, donde la disminución de presión depende de la tasa de flujo.

3.2.1.5 Instrumentos transmisores. Son los elementos que toman la salida del elemento primario y la convierten a una forma mas adecuada para la transmisión a distancia y procesamiento adicional. Las señales que se usan para transmitir la información entre los instrumentos del lazo de control son generalmente de dos tipos: neumáticas y eléctricas. La señal neumática (presión de aire) normalmente esta entre 3 y 15 psi equivalentes a 0.206 y 1.033 bar. Las señales eléctricas pueden ser de 4 a 20 mA, 10 a 50 mA, 1 a 5 voltios o de 0 a 10 voltios. La señal digital utilizada en algunos transmisores es apta directamente para el ordenador.

El elemento primario puede formar parte integral del transmisor en un solo paquete manufacturado en cuyo caso se denomina transductor. Por tanto, el

transductor produce un voltaje de salida correspondiente a una variable de entrada.

3.2.1.6 Elementos convertidores. Son elementos que reciben una señal de entrada neumática (3 a 15 psi) o electrónica (4 a 20 mA) procedente de otros instrumentos y después de modificarla envían la señal en forma de una salida estándar. Como por ejemplo un convertidor I / P transforma la señal de corriente en señal neumática.

3.2.1.7 Elemento final de control o actuador. Los elementos finales de control son los dispositivos encargados de transformar una señal de control en un flujo de masa o energía (variable manipulada). Es esta variable manipulada la que incide en el proceso causando cambios de la variable controlada. Lo más común en procesos es que la manipulación sea un caudal. Para ajustar el flujo de fluidos en una línea existen primariamente dos mecanismos:

- Modificar la energía entregada al fluido (bombas y ventiladores de velocidad variable)
- Modificar la resistencia al paso del fluido (válvulas, registros en ductos de gases)

De los diversos elementos finales de control, el de más amplia difusión es la válvula automática con actuadores neumáticos o eléctricos.

3.2.1.8 Elemento accionador de señales. Son aquellos que toman la salida del elemento sensor y la convierte en una forma más adecuada para un procesamiento adicional, por lo general es una señal de frecuencia, de corriente directa o voltaje de c.d.. Como por ejemplo un amplificador de instrumentación que convierte milivoltios en voltios o un oscilador que convierte un cambio de impedancia en un voltaje de frecuencia variable.

3.2.1.9 Elemento procesador de señales. Son los que toman la señal de salida del elemento accionador y la convierte en una forma mas adecuada para la presentación. Por ejemplo, el convertidor de analógico a digital, que transforma un voltaje en impulsos digitales para entrada en una computadora o microprocesador.

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

Esta clasificación corresponde específicamente al tipo de las señales medidas siendo independiente del sistema empleado en la conversión de la señal de proceso, como ocurre en el caso de los transmisores de nivel de 4 a 20 mA c.c., un receptor controlador con salida de 4 a 20 mA. un convertidor de intensidad presión (I / P) que transforma la señal de 4 a 20 mA c.c. a neumática de 3 a 15 psi y la válvula neumática de control; todo estos instrumentos se consideran de nivel; debido a que esta clasificación es independiente del numero y tipo de transductores existentes entre el elemento primario y el instrumento final

4. TERMINOLOGÍA DE LA INSTRUMENTACIÓN

La experiencia ha demostrado que se pueden presentar una gran cantidad de malas interpretaciones cuando los ingenieros discuten la eficacia de la instrumentación dentro de un proceso. Claramente, esta situación no favorece la parte educativa; adicionalmente, también puede dar lugar a errores en la especificación y en la compra de la instrumentación para satisfacer los requerimientos. Los compradores y proveedores deben compartir una comprensión inequívoca de las especificaciones y desempeño del equipo, incluyendo la instrumentación. De tal manera que las organizaciones profesionales han preparado definiciones normalizadas de los términos más importantes; se aconseja muy bien a los ingenieros practicantes que usen estos términos normalizados.

4.1 RANGO (RANGE)

Conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida o de transmisión de un instrumento. Región dentro de la cual se mide, se recibe o se transmite un valor, se expresa como los valores más bajos y más altos de un rango².

4.2 ALCANCE O SPAN

Es la variación máxima o la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento (rango).

² Ver carpeta de instrumentación en CD (PDF instru_industrial)

4.3 ERROR

Es la diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida.

4.4 PRECISION

Es la tolerancia de la medida o limite de error. Grado de reproducibilidad de las mediciones.

4.5 SENSIBILIDAD

Es la razón entre el incremento de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona. Es el mínimo cambio al que el instrumento sensa y puede expresar.

4.6 RESOLUCIÓN

Es el mayor cambio en la entrada o variable medida sin cambio correspondiente en la salida o valor leído.

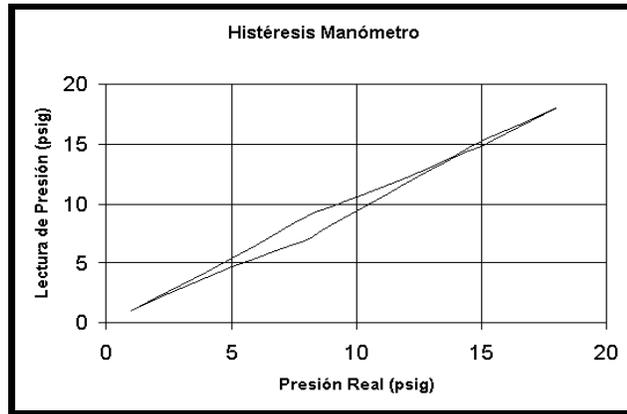
4.7 HISTERESIS (HYSTERESIS)

Diferencia máxima entre los valores indicados por la salida o lectura del instrumento para el mismo valor de entrada cuando la variable recorre toda la entrada en los sentidos ascendente y descendente. Se expresa en porcentaje.

Por ejemplo, si un manómetro de 0 – 100% la presión real es de 18 psi y la lectura en el indicador marca 18.2 psi al ir del cero al cien por ciento de la variable y cuando se encuentra la variable en 18 psi al desplazarse del cien al cero por ciento el valor indicado es 17.7 psi la histéresis se calcularía así:

$$\left(\frac{18.2 - 17.7}{100 - 0} \right) * 100 = \pm 0.5\%$$

Figura 1. Curva de histéresis



4.8 LINEALIDAD (LINEARITY)

Proximidad de la curva de calibración a una línea recta. Se expresa como la máxima desviación de la curva de calibración y la característica especificada de línea recta.

4.9 TRAZABILIDAD

Propiedad del resultado de las mediciones efectuadas con un instrumento o con un patrón, tal que puede relacionarse con patrones preestablecidos (nacionales o internacionales), mediante una cadena ininterrumpida de comparaciones con todas las incertidumbres determinadas.

4.10 TIEMPO DE RESPUESTA (REPOSE TIME)

Tiempo requerido por una salida (lectura) para alcanzar un porcentaje especificado de su valor final, como resultado de un cambio escalón en la entrada.

4.11 EXACTITUD (ACCURACY)

Grado de conformidad de un valor respecto a un valor estandarizado, aceptado y reconocido. La exactitud se expresa como la máxima desviación positiva o negativa respecto al valor real de una magnitud que está siendo medida para condiciones específicas, usualmente se expresa como un porcentaje del valor, del rango del instrumento o del valor a plena escala.

4.12 RANGO DE EXACTITUD

Un número que define un límite de error que no deberá excederse bajo las condiciones de operación de referencia.

Puede incluir los efectos combinados de histéresis, linealidad y repetibilidad.

4.13 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.

4.14 BANDA MUERTA

Son aquellas zonas donde la sensibilidad del instrumento es nula lo que hace que no cambie su indicación y señal de salida; o rango dentro del cual puede variarse una entrada, sin causar un efecto en la señal de salida

4.15 TIEMPO MUERTO

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

4.16 REPETIBILIDAD (REPEATABILITY)

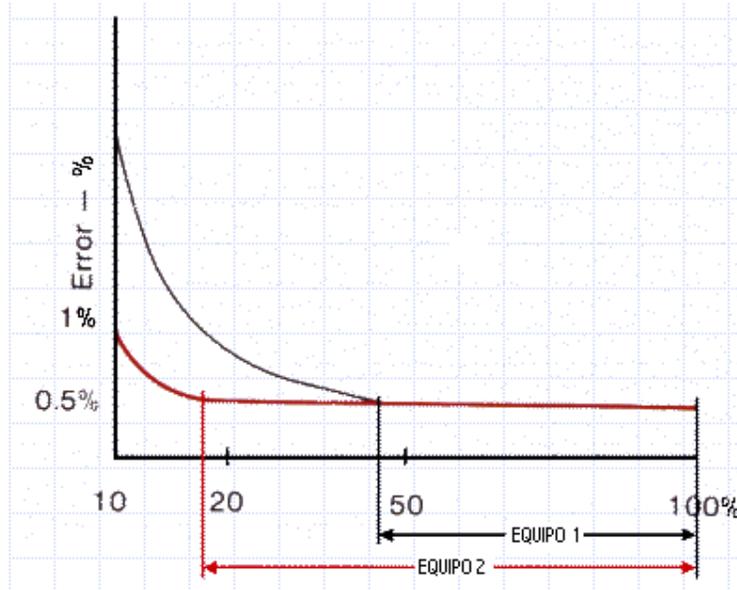
Especifica la habilidad del instrumento para entregar la misma lectura en aplicaciones repetidas del mismo valor de la variable; cuando se mide bajo las mismas condiciones de operación y aproximándose en la misma dirección. Se expresa usualmente como un porcentaje del span y no incluye histéresis; también se le llama precisión.

Por ejemplo, si a una misma presión de 25psi, un manómetro de precisión de 1psi, entrega las lecturas de 25.5, 26, 24.3 y 24 psi su operación es repetible; una lectura de 27psi indicaría un problema de repetibilidad del instrumento (a menos que conste que fuese un problema de histéresis).

4.17 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.

Figura 2. Curva de rango de ajuste



4.18 TURNDOWN

Se define como la relación entre el valor máximo y mínimo que puede tomar el intervalo o alcance de medida (span) del instrumento.

4.19 ESTABILIDAD

Son los instrumentos de alta calidad, que tienen una probabilidad de tener una larga vida útil.

4.20 FIABILIDAD

Es la probabilidad de que el instrumento permanezca en ciertos límites de error.

4.21 RUIDO

Señales impuras que afectan a las diferentes señales del sistema de medición.

4.22 REPRODUCTIBILIDAD (REPRODUCIBILITY)

Similitud de las lecturas de salida para un mismo valor de entrada durante un período de tiempo y aproximándose en ambas direcciones. Se expresa usualmente como un porcentaje del campo de medición (span) e incluye histéresis, fluctuación, repetibilidad y banda muerta.

4.23 FLUCTUACIÓN (DRIFT)

Un cambio inesperado de la salida durante un período de tiempo que no se relaciona con la entrada ni con las condiciones de operación.

5. ERROR

Como bien sabemos los instrumentos industriales pueden medir, transmitir y controlar las variables que intervienen en un proceso. En todas estas funciones existe una relación entre la variable de entrada y la variable de salida del instrumento (ejemplo, temperatura real a señal de salida neumática en un transmisor neumático de temperatura, señal eléctrica de entrada neumática a señal de salida en un convertidor), estas relaciones pueden encontrarse también en las partes internas del instrumento en particular cuando este es complejo, como en el caso de un instrumento controlador miniatura para montaje en panel el cual esta compuesto por varios bloques: una unidad de punto de consigna o valor deseado de la variable medida (existe relaciona entre la posición del botón de mando y la señal estándar que va al bloque controlador), una unidad de mando (hay relación entre la posición del Boston de mando o indicación de posición y la señal de salida a la válvula de control), una unidad de control entre otras (relación entre la señal de error y la señal de salida a la válvula de control, la cual es función de las acciones que posea el controlador), o en el caso de un transmisor de caudal de diafragma el cual esta constituido por dos bloques uno es el elemento de presión diferencial (se relacionan la diferencia de presiones de entrada con el giro del eje de salida del cuerpo) y el otro el transmisor (se relacionan el giro del eje de salida del cuerpo y la salida estándar del transmisor).

Así pues, un instrumento o una de sus partes pueden considerarse como dispositivos de conversión de señales que pasan de una variable de entrada (presión, temperatura, nivel, etc.) a una o varias funciones en la salida (indicación de la variable de entrada, lectura de un índice, transmisión de la variable de entrada en señal neumática o eléctrica, etc.)

Entonces, existe una correspondencia entre la variable de entrada y la de salida, representando esta última el valor de la variable de entrada. Siempre que el valor representado corresponda exactamente al de la variable de entrada el instrumento estará efectuando una medición correcta; pero en la práctica, los instrumentos determinan en general unos valores inexactos en la salida que se apartan en mayor o menor grado del valor verdadero de la variable de entrada, lo cual constituye el error de la medida.

El error es universal e inevitable y acompaña a toda medida (aunque esta sea muy elaborada, o aunque se efectúe un gran número de veces), el valor verdadero no puede establecerse con completa exactitud y es necesario encontrar unos límites que lo definan, de modo que sea práctico calcular la tolerancia de la medida.

5.1 ERROR ESTÁTICO

Error obtenido cuando el proceso está en régimen permanente y la variable medida no cambia su valor.

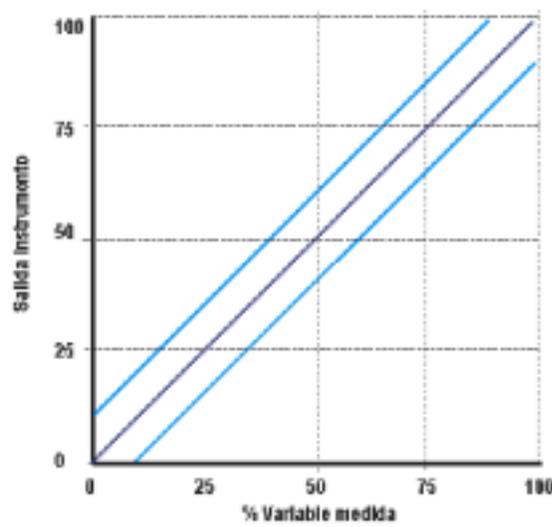
5.2 ERROR DINÁMICO

Diferencia entre el valor instantáneo de la variable y el valor leído por el instrumento y es afectado por las condiciones dinámicas del proceso.

5.3 ERROR DE CALIBRACIÓN

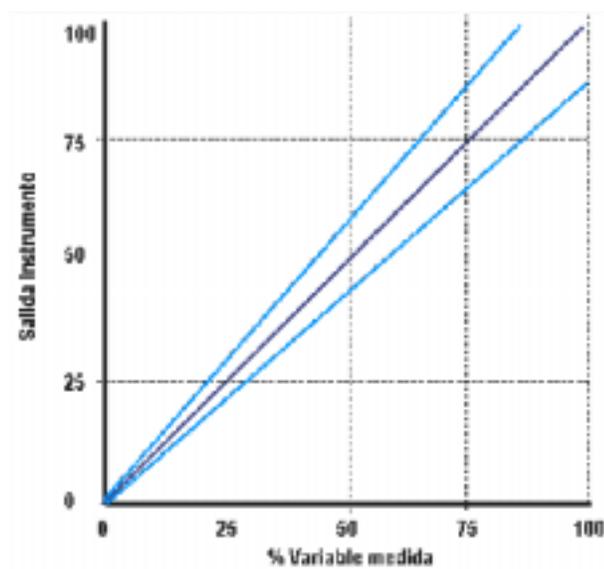
5.3.1 Error de cero. Todas las lecturas están desplazadas un mismo valor con relación a la recta representativa del instrumento como se puede ver en la figura, se observa que el desplazamiento puede ser positivo o negativo. El punto de partida o de base de la recta representativa cambia en que varíe la inclinación o la forma de la curva.

Figura 3. Curva de error de cero



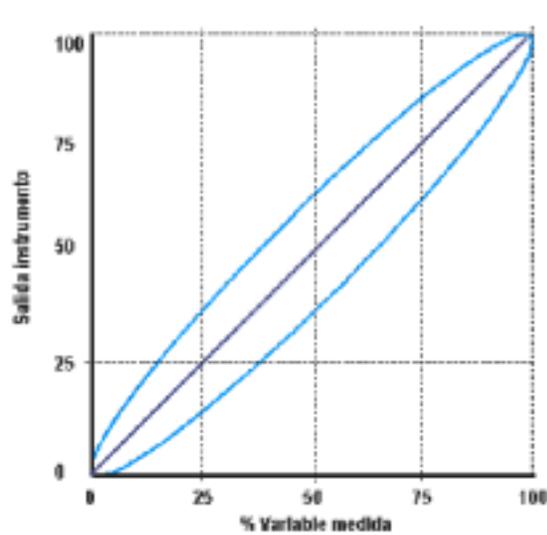
5.3.2 Error de multiplicación. Todas las lecturas aumentan o disminuyen progresivamente con relación a la recta representativa, según puede verse en la figura, en la que se observa que el punto base no cambia y que la desviación progresiva puede ser positiva o negativa.

Figura 4. Curva de error de multiplicación



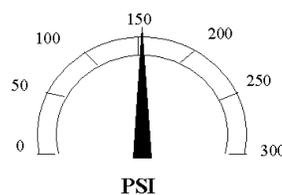
5.3.3 Error de angularidad. La curva real coincide con el cero y cien por ciento de la recta representativa, pero se aparta de la misma en los puntos restantes; en la figura puede verse un error de este tipo donde la máxima desviación suele estar hacia la mitad de la escala.

Figura 5. Curva de error de angularidad



5.3.4 Error de paralelaje. Si la visual del observador hacia el apuntador de un instrumento indicador no es perpendicular a la superficie de la escala del instrumento, la lectura será mayor o menor, dependiendo esto de sí el ojo del observador se encuentra a la izquierda o derecha de la perpendicular. El grado de error de paralelaje dependerá de la altura del apuntador con respecto a la escala, y del seno del ángulo entre la visual y la perpendicular.

Figura 6. Curva de error de paralelaje



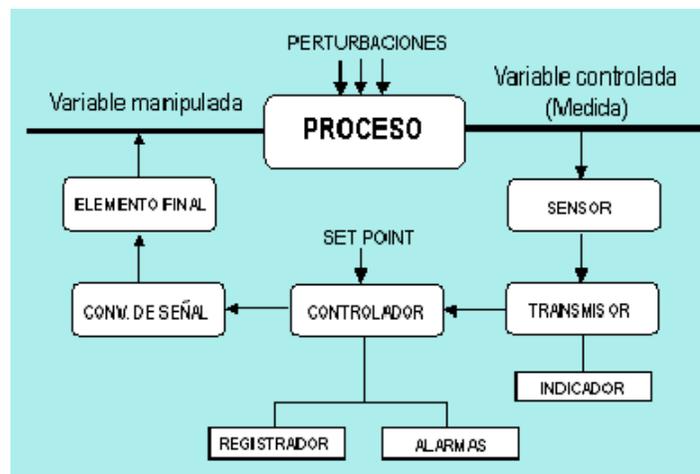
6. SIMBOLOGÍA DE LA INSTRUMENTACIÓN

Para designar y representar los instrumentos de medición y control se emplean normas muy variadas que a veces varían de industria a industria. Esta gran variedad de normas y sistemas utilizados en las organizaciones industriales indica la necesidad universal de una formalización en este campo; varias sociedades han dirigido sus esfuerzos en este sentido, entre ellas se encuentra como una de las importantes la Sociedad de Instrumentos de Estados Unidos, ISA; cuyas normas tienen por objeto establecer sistemas de designación (códigos y símbolos) de aplicación a las industrias químicas, petroquímicas, aire acondicionado, etc. Cabe anotar que estas normas no son de uso obligatorio sino que constituyen una recomendación a seguir en la identificación de los instrumentos en la industria.

6.1 ESQUEMAS DE BLOQUES

Todo sistema de instrumentación posee el siguiente esquema lógico:

Figura 7. Diagrama de proceso



6.2 TAG NUMBER

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

Figura 8. Letras de identificación



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

1. Disponer las letras en subgrupos, ejemplo, un transmisor registrador de relación de caudales con un interruptor de alarma de relación de caudales puede identificarse con dos circulaos uno con FFRT-3 y el otro FFS-3.
2. En un instrumento que indica y registra la misma variable medida puede omitirse la letra I (indicación).
3. Los bucles o lazos de instrumentos de un proyecto o secciones de un proyecto deben identificarse con una secuencia única de numeras; esta puede comenzar con el 1 o cualquier otro numero conveniente, tal como 101, 301 1201 que puede proporcionar información codificada tal como área de planta.
4. Si un bucle dado tiene mas de un instrumento con la misma identificación funcional, es preferible añadir un sufijo, ejemplo FV-2A, FV-2B,FV-2C, etc.

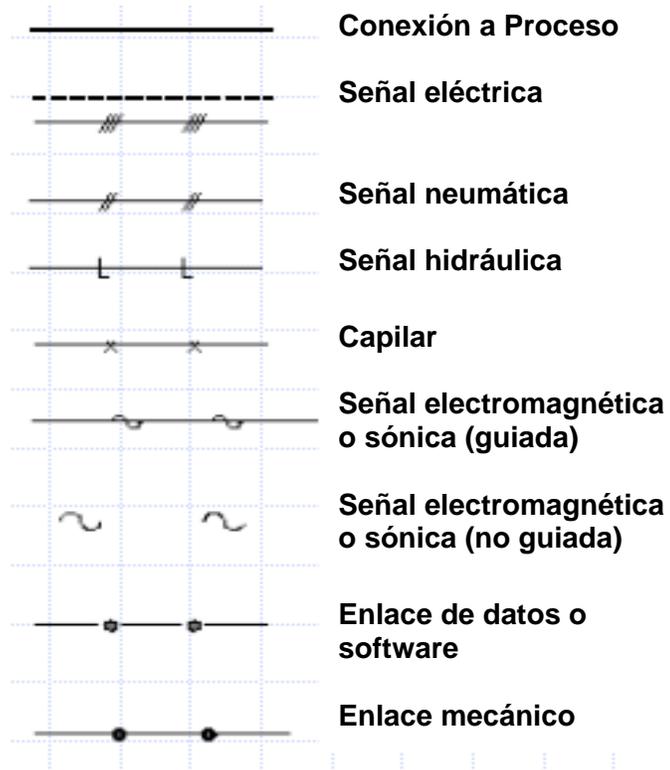
6.3 LETRAS DE IDENTIFICACIÓN

Figura 9. Significado de letras de identificación

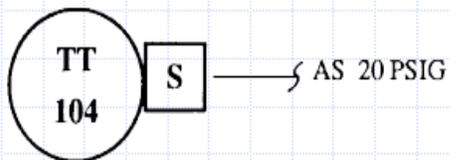
	Primera Letra		Letras Sucesivas		
	Variable medida	Modificador	Función de lectura o pasiva	Función de salida	Modificador
A	Análisis		Alarma		
B	Quemador, combustión		Selección del usuario	Selección del usuario	Selección del usuario
C	Selección del usuario			Controlador	
D	Selección del usuario	Diferencial			
E	Tensión		Sensor (elemento primario)		
F	Rata de flujo	Relación			
G	Selección del usuario		Dispositivo de vidrio, miilla		
H	Manual				Alto
I	Corriente (eléctrica)		Indicación		
J	Potencia	Muestreo			
K	Tiempo	Rata de tiempo		Estación de control	
L	Nivel		Luz		Bajo
M	Humedad	Momentáneo			Medio, intermedio
N	Selección del usuario		Selección del usuario	Selección del usuario	Selección del usuario
O	Selección del usuario		Orificio, restricción		
P	Presión, vacío		Punto de prueba		
Q	Cantidad	Integrador, totalizador			
R	Radiación		Registrador		
S	Velocidad, frecuencia	Safety		Interruptor	
T	Temperatura			Transmisor	
U	Multivariable		Multifunción	Multifunción	Multifunción
V	Vibración, análisis mecánico			Válvula, damper	
W	Peso, fuerza		Vaina o pozo térmico		
X	Sin clasificar	Eje X	Sin clasificar	Sin clasificar	Sin clasificar
Y	Evento, estado, o presencia	Eje Y		Relé, convertidor	
Z	Posición, dimensión	Eje Z		Elemento final, actuador	

6.4 LINEAS DE TRANSMISIÓN

Figura 10. Líneas de transmisión



TIPOS DE ALIMENTACIÓN



- AS Suministro de aire
- IA- Aire instrumentos
- PA- Aire de la planta
- ES Suministro eléctrico
- GS Suministro de gas
- HS Suministro hidráulico
- NS Suministro de nitrógeno
- SS Suministro de vapor
- WS Suministro de agua

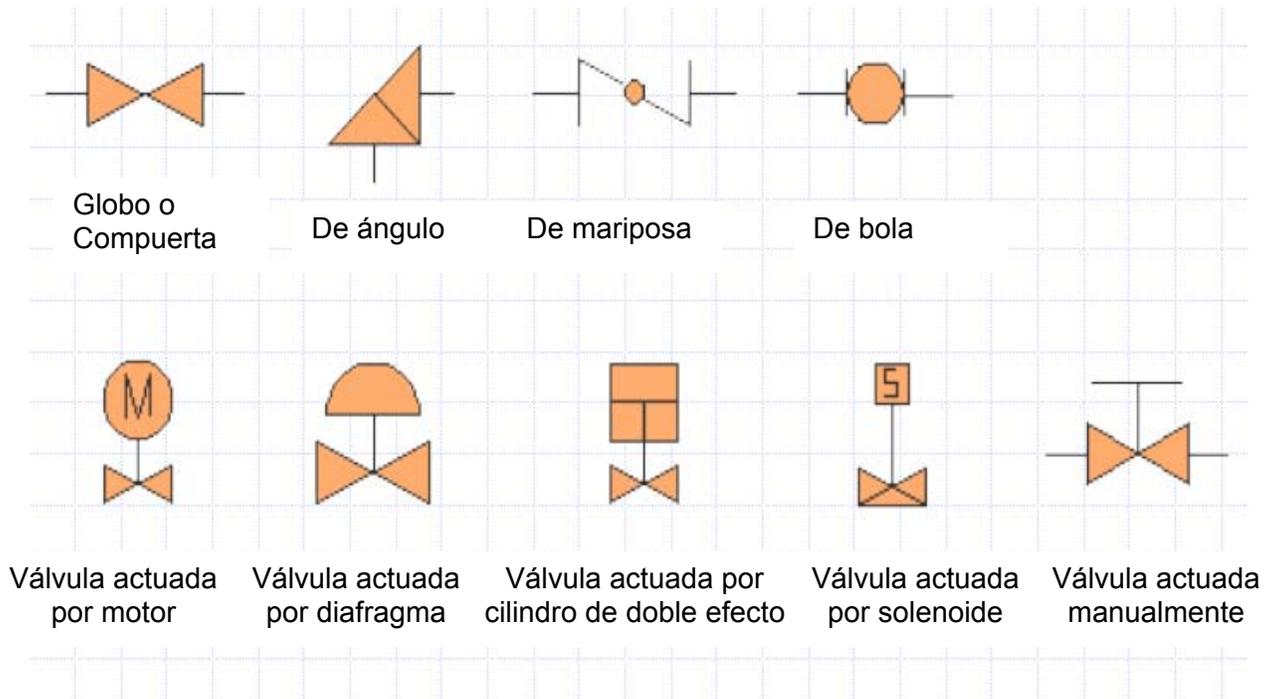
6.5 SIMBOLOGIA ISA S5-1

Figura 11. Simbología ISA S5-1

	Montaje Local	Montaje en campo	Montaje en Panel auxiliar
Instrumento discreto			
Instrumento Control distribuido			
Función Computador			
Función PLC			

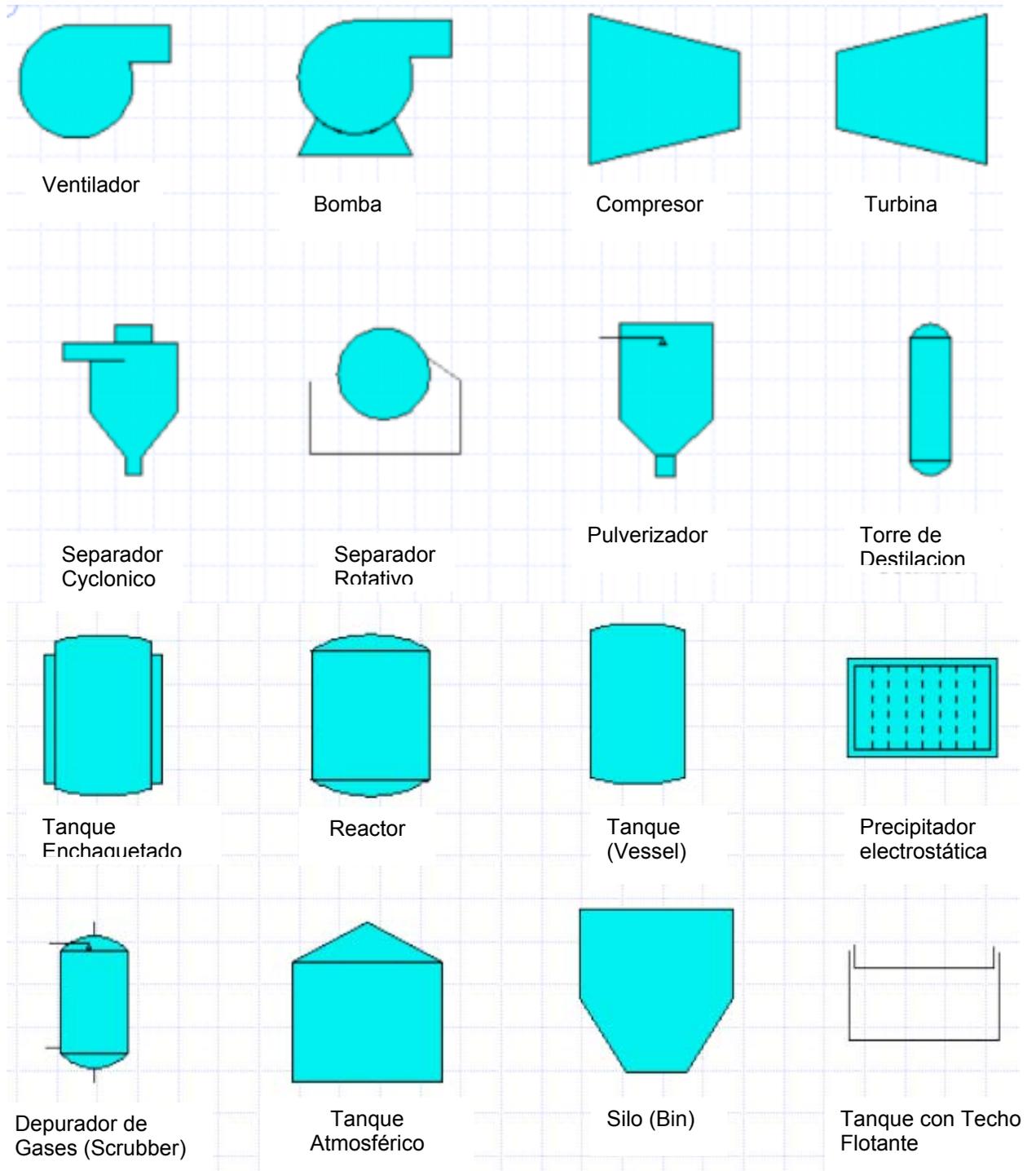
6.6 SIMBOLOGIA DE VÁLVULAS

Figura 12. Simbología de Válvulas



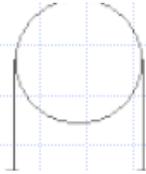
6.7 EQUIPOS DE PROCESO

Figura 13. Equipos de proceso

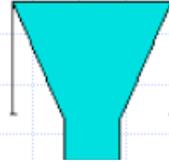




Tanque para gases



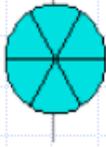
Tanque presurizado



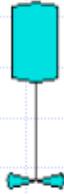
Tolva de Pesaje



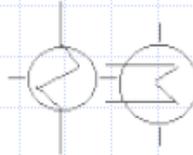
Banda Transportadora



Alimentador rotativo



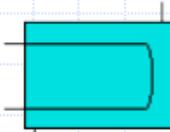
Agitador



Intercambiador de calor



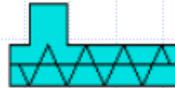
Horno



Evaporador



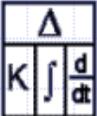
Mezclador de línea



Tornillo alimentador

6.8 SÍMBOLOS DE PROCESAMIENTO AUTOMÁTICO DE SEÑAL

Figura 14. Símbolos de procesamiento automático

	Controlador PI		Controlador PID
	Extractor raíz cuadrada		Selector de alta señal
	Sumador		Selector de baja señal
	Multiplicador		Limitador de alta señal
	Divisor		Limitador de baja señal
	Monitor de señal Alta(Alarma)		Limitador de velocidad
	Monitor de señal Baja(Alarma)		Función
	Monitor de señal alta/Baja(Alarma)		La salida es una función temporizada de la entrada

7. ELEMENTOS PRIMARIOS

Para cada variable controlada, y para muchas otras variables adicionales usadas para monitorear procesos, se proporcionan los sensores correspondientes. Para seleccionar el sensor apropiado para una determinada aplicación se consideran algunos factores generales tales como:

- **Exactitud:** Este siempre es un factor muy importante a considerar; sin embargo, no siempre se requiere una exactitud muy alta. Dado que los sensores con una exactitud muy alta usualmente son más costosos, el ingeniero debe asegurarse de alcanzar la exactitud requerida a un costo razonable.
- **Buena reproducibilidad:** Requerida cuando el sensor es usado par aplicaciones de control, incluso cuando la alta exactitud no es necesaria.
- **Rapada Respuesta Dinámica:** deseada especialmente cuando la instrumentación esta ubicada en un lazo de control retroalimentado, debido a que un lazo con una dinámica lenta conduce a un mal desempeño del control.
- **Confiabilidad:** esto es, la instrumentación debe realizar su función con una baja probabilidad de falla. Un instrumento que sea adecuado para las condiciones del proceso y un mantenimiento periódico, son factores que contribuyan a la confiabilidad.

Otra decisión, muy común que se debe tener en cuenta con todos los sensores es el **Rango** sobre el cual el sensor medirá la variable. El rango debe establecerse de tal manera que: primero, incluya los valores típicos experimentados en la operación normal, segundo, incluya las perturbaciones esperadas, y tercero que proporcione una buena exactitud. Para la mayoría de los sensores, un rango muy grande reduce la exactitud y la reproducibilidad; por lo tanto, se requiere un equilibrio entre estos parámetros. En algunos casos los tres objetivos podrían no ser asequibles con un solo sensor; entonces, se requerirán dos sensores para que

proporcionen el rango y la exactitud adecuada.

Los sensores presentados a continuación miden las variables más comunes en determinados procesos industriales (nivel, flujo, temperatura, presión), al igual exponemos sensores que se utilizan para medir otras variables menos frecuentes pero de gran importancia en los procesos (composición, análisis, etc.).

A los sensores que miden las variables más comunes se les denomina “sensores directos” ya que sus principios de medición son mucho más simples que los de un analizador de composición o simplemente un analizador. Sin embargo, ningún sensor mide realmente la variable de proceso directamente; cada sensor mide el efecto de la variable de proceso mediante la indicación de una posición física, una fuerza, un voltaje u otra propiedad más fácilmente medible. La relación entre la variable de proceso y la cantidad realmente medida no es exacta, y el ingeniero debe entender conceptos tales como: la exactitud, el rango, y los límites del proceso, para seleccionar el sensor más apropiado.

7.1 SENSORES DE TEMPERATURA

El control de la temperatura³ es importante en los procesos de separación y de reacción, además, la temperatura debe mantenerse dentro de ciertos límites para que la operación de los equipos de proceso sea segura y confiable. La temperatura puede medirse por muchos métodos, pero para poder seleccionar el mejor sensor para cada aplicación se debe comprender muy bien cuales son las fortalezas y las limitaciones de cada sensor.

En casi todos los casos, el sensor de temperatura está protegido contra los materiales del proceso para prevenir cualquier interferencia al sensar adecuadamente y evitar de esta manera el daño del sensor. Como resultado de

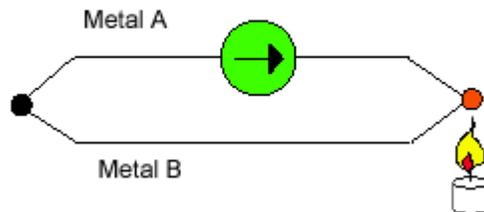
^{3 3} Ver carpeta de instrumentación en CD (PDF instru_industrial)

esto, se encontrarán algunas barreras entre el proceso (o sustancia del proceso) y el sensor el cual físicamente fuerte y químicamente resistente; a menudo, esta barrera se denomina funda o termopozo. Una ventaja adicional de tal barrera es la habilidad de quitar, reemplazar, y calibrar el sensor sin interrumpir la operación del proceso.

Dentro de los sensores más comunes están: la termocupla, las RTDs, los termistores, entre otros.

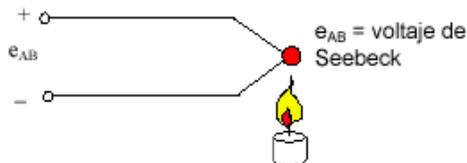
7.1.1 Termocuplas. Cuando dos alambres de metales diferentes son unidos en ambos extremos y uno de los extremos es calentado, entonces circulará una corriente continua a través del circuito termoelectrico. Este descubrimiento fue realizado por Thomas Seebeck en 1821.

Figura 15. Efecto Seebeck



Si el circuito se abre en el centro, el voltaje de circuito abierto (Voltaje de Seebeck) es función de la temperatura de la unión y de la naturaleza de los dos metales.

Figura 16. Voltaje Seebeck



Todos los metales disímiles exhiben este efecto. Las combinaciones más comunes se muestran en la Tabla, así como sus características más importantes.

Figura 17. Tipos de termocuplas y sus características más importantes

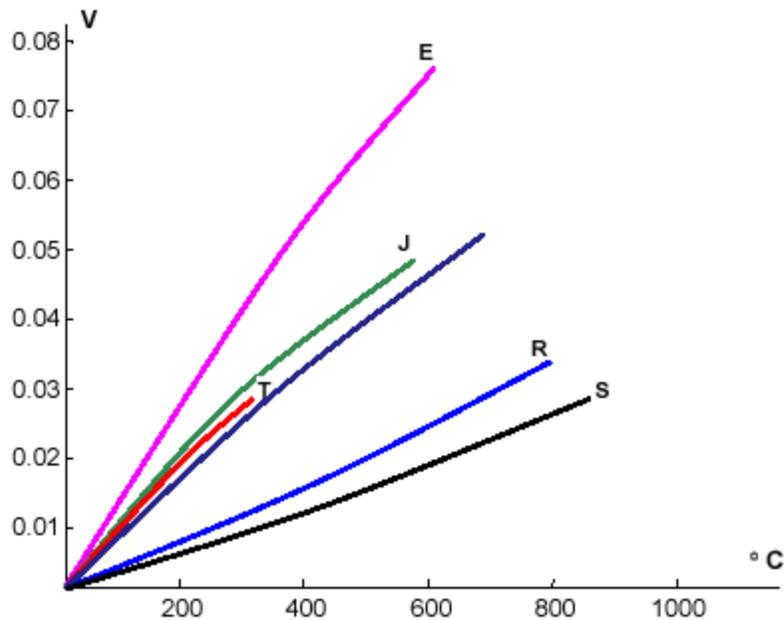
TIPO	METAL		CODIGO DE COLOR	COEFIC. DE SEEBECK		°C ERROR	RANGO NBS TEMP.
	+	-		+	-		
B	Platino-6% Rodio	Platino-30% Rodio	No aplica	6	600	4.4 - 8.6	0 a 1820 °C
E	Níquel-10% Cromo	Constantán	Violeta Rojo	58.5	0	1.7 - 4.4	-270 a 1000°C
J	Hierro	Constantán	Blanco Rojo	50.2	0	1.1 - 2.9	-210 a 760°C
K	Níquel-16% Cromo	Níquel	Amarillo Rojo	39.4	0	1.1 - 2.9	-270 a 1372°C
N (AWG 14)	Nicrosil	Nisil	-	39	600	-	0 a 1300°C
N (AWG 28)	Nicrosil	Nisil	-	26.2	0	-	-270 a 400°C
R	Platino-10% Rodio	Platino	-	11.5	600	1.4 - 3.8	-50 a 1768°C
S	Platino-13% Rodio	Platino	-	10.3	600	1.4 - 3.8	-50 a 1768°C
T	Cobre	Constantán	Azul Rojo	38	0	0.8 - 2.9	-270 a 400°C
W-Re	Tugsteno-5% Renio	Tugsteno - 26% Renio	-	19.5	600	-	0 a 2320°C

Para pequeños cambios en la temperatura, el voltaje Seebeck es linealmente proporcional a la temperatura:

$$e_{AB} = \alpha \cdot T$$

Donde α es el coeficiente de Seebeck, es la constante de proporcionalidad.

Figura 18. Temperatura de termocuplas vs voltaje



Sólo la termocupla tipo K es aproximadamente constante en el rango de 0 a 1000° C. En consecuencia, la tipo K puede ser usada con un voltímetro más amplificador y una referencia de punto de hielo externa para así obtener una exactitud moderada al leer directamente la temperatura.

La mayor exactitud en la conversión puede ser obtenida por la lectura del voltímetro y consultando las tablas de la NBS (National Bureau of Standarts) o aplicando la ecuación de conversión de temperatura:

$$T = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_n x^n ; \text{ donde:}$$

T : temperatura en ° C

x : voltaje de termocupla

a : Coeficientes polinomiales, únicos para cada termocupla

n : máximo orden del polinomio

Al incrementar n, se incrementa la exactitud alcanzada mediante el polinomio de la ecuación. Un número representativo es n = 9 para ±1° C de exactitud.

Precauciones prácticas:

Se han discutido los conceptos de la unión de referencia, como usar un polinomio para extraer el dato de temperatura absoluta, y se ha mirado el sistema de adquisición de datos para minimizar los efectos del ruido. Ahora se mirará el cable mismo de la termocupla. La curva polinomial es fiable si el cable de la termocupla está perfecto, esto es, si no ha sido descalibrado durante la medición de temperatura. Muchos errores de medición pueden ser originados por una de éstas fuentes primarias de error:

- ❑ Conexión de la unión pobre
- ❑ Descalibración del alambre de la termocupla
- ❑ Puenteado térmico
- ❑ Ruido y corrientes de fuga
- ❑ Especificaciones de la termocupla
- ❑ Documentación

Conexión pobre de la unión: existen muchas formas aceptables de unir los dos alambres de una termocupla: soldadura, soldadura de plata, remachado, etc.. Cuando los alambres de la termocupla son soldados, se introduce un tercer metal en el circuito de la termocupla, pero como la temperatura en ambos lados de la termocupla es la misma, la soldadura no introduce error. La soldadura limita la máxima temperatura de la unión. Para alcanzar una temperatura mayor, la unión puede ser remachada. Pero la remachada no es un proceso suave. El sobrecalentamiento puede degradar la termocupla, y el gas utilizado para remachar y la atmósfera en la cual es remachado pueden ambos difundir en el metal de la termocupla, cambiando sus características.

Una pobre soldadura, puede resultar es una conexión abierta, pero esta puede ser detectada fácilmente en una medición.

Descalibración: La descalibración puede hacer que la termocupla registre una temperatura incorrecta. La descalibración puede resultar de la difusión de partículas atmosféricas en el metal, causadas por temperaturas extremas o por gradientes de temperatura.

Impedancia en paralelo: Las altas temperaturas pueden afectar los aisladores de los alambres de la termocupla. La resistencia de aislamiento decrece con el aumento de temperatura y puede crear una unión virtual.

Acción galvánica: El recubrimiento utilizado en el aislamiento de algunas termocuplas puede formar un electrolito en presencia de agua. Esto crea una acción galvánica, la cual puede dar una salida cientos de veces mayor que la del efecto Seebeck.

Puenteado térmico: Ninguna termocupla puede ser hecha sin masa. Desde luego se utiliza energía para calentar cualquier masa, la termocupla alterará ligeramente la temperatura a medir. Si la masa a ser medida es pequeña, la termocupla naturalmente debe ser pequeña. Pero una termocupla hecha con alambres pequeños es más susceptible a problemas de contaminación, esfuerzos e impedancia en paralelo. Para minimizar éstos efectos, se utiliza un cable de extensión a la termocupla, el cual, está fabricado con metales que tiene coeficientes de Seebeck muy similares a los del tipo particular de termocupla.

7.1.2 La RTD. El mismo año que Seebeck hizo su descubrimiento de la termoelectricidad, Sir H. Davy anunció que la resistividad de los materiales variaba con la temperatura.

Cinco años más tarde W. Siemens probó el uso del platino como elemento en un termómetro de resistencia⁴ (PRTD). El platino sigue siendo usado hoy en día como elemento primario de alta precisión. Aunque es un dispositivo muy estable el PRTD ofrece un contacto térmico, entre el platino y el punto medido muy pobre.

Los RTD's o Detectores de Temperatura por Resistencia se fabrican de alambre doble bobinado y rodeados de vidrio o cerámica. Otros se fabrican en película metálica depositada sobre un sustrato cerámico. Todos los metales producen un cambio positivo en la resistencia para un cambio positivo en la temperatura. Como se estudiará posteriormente, el error se minimiza cuando el valor nominal de la resistencia de la RTD es grande. Esto implica un metal con alta resistividad.

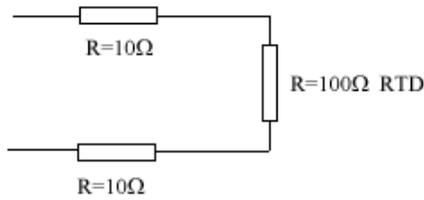
Aunque relativamente costoso, el platino es la elección más común para la producción de termómetros industriales por resistencia; se utilizan metales más económicos como el cobre y el níquel para aplicaciones menos exigentes. El platino es el metal perfecto porque es químicamente inerte, tiene características lineales de resistencias y temperatura y la gama de temperatura va de -200° a 800° C. Si bien el PRTD es un dispositivo muy estable, ofrece un contacto térmico, entre el platino y el punto medido muy pobre. El cobre, tiene alta linealidad y se utiliza hasta 120° C, el níquel tiene un rango limitado y varía en el tiempo (deriva).

Medición de resistencia:

Los valores típicos de RTD son de 10 Ω hasta 100 Ω a 0°C. El coeficiente estándar del platino es α (platino) = 0.00385 para 100 Ω 0.385 $\Omega / ^\circ$ C. Para un alambre de 100 Ω esto corresponde a 0.385 $\Omega / ^\circ$ C a 0°C. Una impedancia en los cables que conectan al sensor, por pequeña que sea, contribuye significativamente al error en la medición de la temperatura.

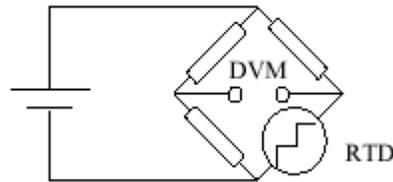
⁴ Ver carpeta de instrumentación en CD (PDF Instr_industrial)

Figura 19. Efecto de la resistencia de los cables



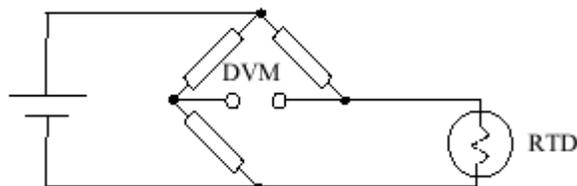
Una impedancia de $10\ \Omega$ en los cables implica $10/0.385 = 26^\circ\text{C}$ de error en la medición. Además el coeficiente de temperatura del cable puede contribuir a un error medible. El método clásico de solución de este problema es el uso de un puente.

Figura 20. Puente de Wheastone



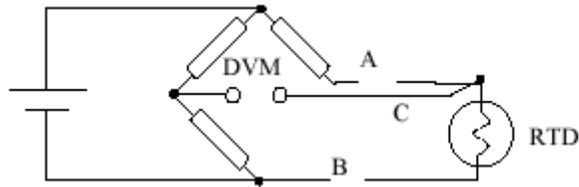
La salida de voltaje del puente es una indicación indirecta de la resistencia del RTD. El puente requiere cuatro cables de conexión, una fuente externa y tres resistores que tengan coeficiente de temperatura cero. Para evitar que los tres resistores estén a la misma temperatura que la RTD, la RTD es separada por medio de dos cables de extensión:

Figura 21. Extensión de la RTD



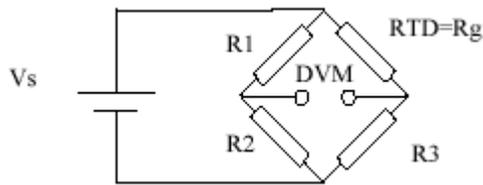
Esta extensión recrea el problema que se tenía inicialmente: la impedancia de los cables de extensión afectan la lectura de temperatura. Este efecto se minimiza usando una configuración de puente con tres cables:

Figura 22. Puente de tres cables.



Si A y B tienen la misma longitud sus efectos resistivos se cancelan. El tercer alambre (C) no lleva corriente. El puente de Wheatstone crea una relación no lineal entre el cambio de resistencia y la salida de voltaje:

Figura 23. Puente de Wheatstone



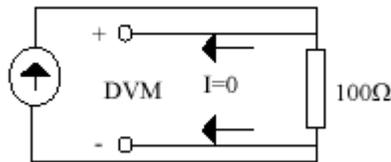
Si se conoce V_s y V_o , se puede hallar R_g y resolver para la temperatura. El voltaje de desbalance V_o del puente con $R_1 = R_2$ es:

$$V_o = V_s \left(\frac{R_3}{R_3 + R_g} \right) - V_s \left(\frac{1}{2} \right)$$

Requiriendo una ecuación adicional para convertir la salida de voltaje es una impedancia equivalente RTD.

Medición con 4 Cables: La técnica de usar una fuente de corriente con un voltímetro digital remoto alivia muchos de los problemas asociados con el puente. La salida de voltaje leída por el DVM es directamente proporcional a la resistencia RTD, y sólo una ecuación de conversión es necesaria.

Figura 24. Medida de resistencia con cuatro cables.



PRECAUCIONES PRÁCTICAS:

Construcción: Debido a su construcción, la RTD es más frágil que la termocupla.

Autocalentamiento: A diferencia de la termocupla, la RTD no se autoalimenta. Una corriente debe pasar a través del dispositivo para producir un voltaje que pueda ser medido. La corriente causa un calentamiento de la RTD por efecto Joule ($I^2 R$), cambiando su temperatura y produciendo error en la medición.

Deriva Térmica (Thermal Shunting): La deriva térmica es la alteración de la medición de temperatura por la inserción de un transductor en la medición. Esto es más problemático con las RTDs que con las termocuplas, ya que a medida que aumenta el tamaño de las RTDs es mucho mayor el efecto que en la termocupla.

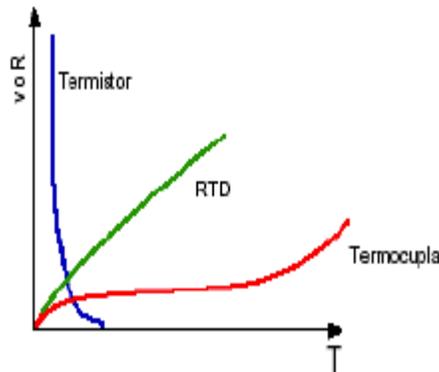
Campo Electromagnético térmico (EMF): Las conexiones de platino cobre con las que se fabrican las RTD pueden causar un voltaje de offset térmico.

Figura 25. Diferencias entre RTDS

PEQUEÑAS RTD's	GRANDES RTD's
Rápida Respuesta en el tiempo	Lenta Respuesta en el tiempo
Bajo Thermal Shuting	Alto Thermal Shuting
Alto Error de Autocalentamiento	Bajo Error de Autocalentamiento

7.1.3 El termistor. Al igual que la RTD, el termistor es otro sensor resistivo de temperatura. Aunque la termocupla es el transductor de temperatura más versátil, el PRTD (Platinum Resistance Temperature Detector) es el más estable; la palabra que mejor describe el termistor⁵ es sensibilidad. De las tres categorías de sensores, el termistor exhibe, de lejos, el parámetro de cambio con la temperatura más extenso.

Figura 26. Comparación de la sensibilidad de los sensores de temperatura



Los termistores generalmente están compuestos de materiales semiconductores. Aunque hay disponibles termistores con coeficientes positivos de temperatura (TC), muchos termistores tiene un coeficiente negativo, esto es, su resistencia decrece con el aumento de temperatura. Con una **NTC** es posible detectar pequeños cambios que no son posibles detectar con una termocupla o RTD.

⁵ Ver carpeta de instrumentación en CD (PDF instr_industrial)

El precio a pagar por la sensibilidad es la no-linealidad. El termistor es extremadamente no lineal y depende de los procesos de fabricación, razón por la cual los fabricantes no han estandarizado las curvas de calibración.

Una curva individual puede tener la ecuación: $1/T = A + B \ln R + C (\ln R)^3$

Medición

No se requiere la medición valor común con puente.

Ejemplo: un de termistor es $5 \text{ k } \Omega$ a 25° C con T.C de $4\%/^\circ\text{C}$

Una resistencia en los cables de 10Ω sólo produce un error de a 0.05° C error.

Desventajas.

- Descalibración
- Limitado a algunos cientos de grados centígrados
- Muy pequeños- responde rápidamente pero tiene autocalentamiento
- Más frágiles que RTD y termocuplas

7.1.4 Sensor de temperatura lineal monolítico. Actualmente existen transductores de temperatura en circuitos integrados. Estos se encuentran disponibles en dos configuraciones: con salida de voltaje o de corriente. Ambos proporcionan una salida que es linealmente proporcional a la temperatura absoluta. Los valores típicos de salida son de $1 \mu\text{A} / ^\circ\text{K}$ y $10 \text{ mV} / ^\circ\text{K}$.

Excepto por el hecho de que la salida es lineal con la temperatura, estos dispositivos presentan un rango muy limitado de temperatura. Tienen los mismos problemas de fragilidad, autocalentamiento y requieren una fuente externa. Estos dispositivos proveen una forma muy conveniente de suministrar un voltaje análogo proporcional a la temperatura, tal como se necesita en el circuito de compensación de la unión de referencia de la termocupla.

Figura 27. Sensor de corriente

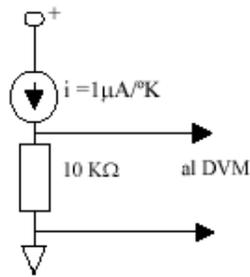
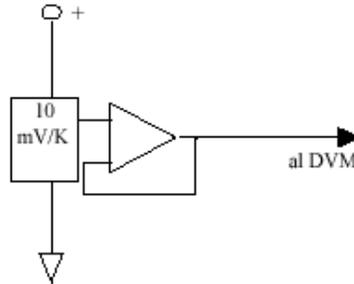


Figura 28. Sensor de voltaje



En la siguiente figura se comparan los diferentes tipos de sensores de temperatura:

Figura 29. Comparación de los diferentes sensores de temperatura.

	TERMOCUPLA	RTD	TERMISTOR	SENSOR C.I.
CURVA	 	 	 	
VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> • Autoalimentado • Simple • Robusto • Económico • Amplia variedad • Amplio rango de temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> • Más estable • Más preciso • Más lineal que la termocupla 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta salida • Rápido • Medida de resistencia con dos alambres 	<ul style="list-style-type: none"> • Más lineal • Salida bastante alta • Económico
DESVENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> • No lineal • Bajo voltaje • Requiere referencia • Poca estabilidad • Baja sensibilidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Costoso • Requiere fuente de corriente • Pequeño cambio de resistencia • Resistencia absoluta baja • Autocalentamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • No-lineal • Rango de temperatura limitado • Frágil • Requiere fuente de corriente • Autocalentamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • $T < 200^{\circ}\text{C}$ • Requiere fuente de potencia • Autocalentamiento • Configuración limitada • Lento

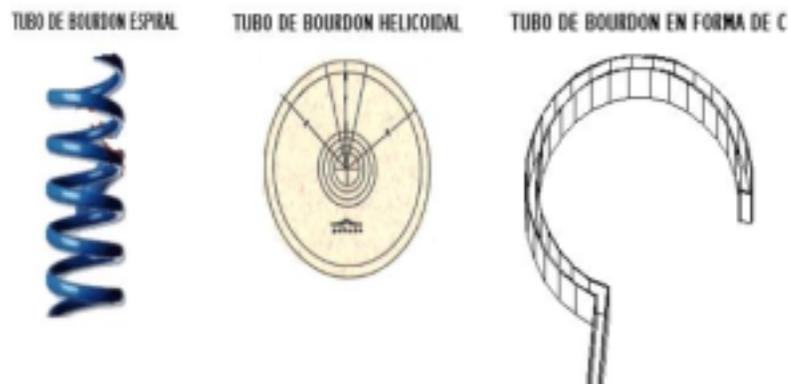
7.2 SENSORES DE PRESIÓN

La mayoría de los materiales líquidos y gaseosos manejados en los procesos industriales se mantienen dentro de recipientes cerrados. Para seguridad del personal de planta y protección de los recipientes, la presión en dichos recipientes se mantiene controlada. Adicionalmente la presión se controla porque su influencia es clave en la operación de procesos, como por ejemplo, en el equilibrio vapor-líquido, en la respuesta de reacción química, y en el flujo de fluido.

Los sensores más comunes utilizados son los siguientes: tubo bourdon, diafragmas, fuelles, y sensores que basan su funcionamiento en principios eléctricos.

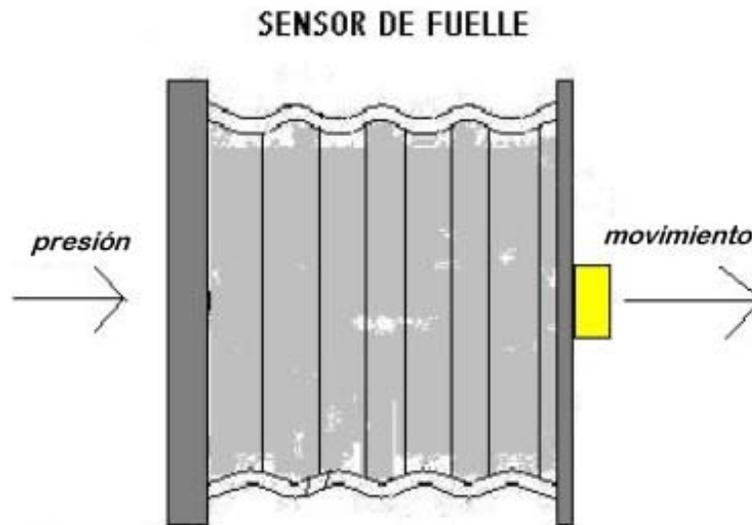
7.2.1 Bourdon. Un tubo bourdon es un tubo curvado, vacío el cual recibe la presión del fluido del proceso que llega al tubo. La presión en el tubo provoca una deformación del mismo, de tal manera que tiende a desenrollarse o deformarse. Esta presión puede determinarse mediante el desplazamiento mecánico del indicador conectado al tubo Bourdon. Las formas típicas para el tubo son “C” (normalmente para la indicación local), espiral y helicoidal.

Figura 30. Diseños de tubo Bourdon



7.2.2 Fuelle. Un fuelle es un recipiente cerrado con lados que pueden extenderse y contraerse, como un acordeón. La posición del fuelle sin presión puede ser determinada por fuelle mismo o mediante un resorte. La presión se aplica a la cara del fuelle, y su deformación y su posición dependen de la presión.

Figura 31. Sensor de fuelle



7.2.3 Diafragma. Un diafragma se construye típicamente con dos discos flexibles, y cuando a una cara del diafragma se le aplica una presión, la posición del otro disco cambia debido a la deformación. La posición puede relacionarse con la presión.

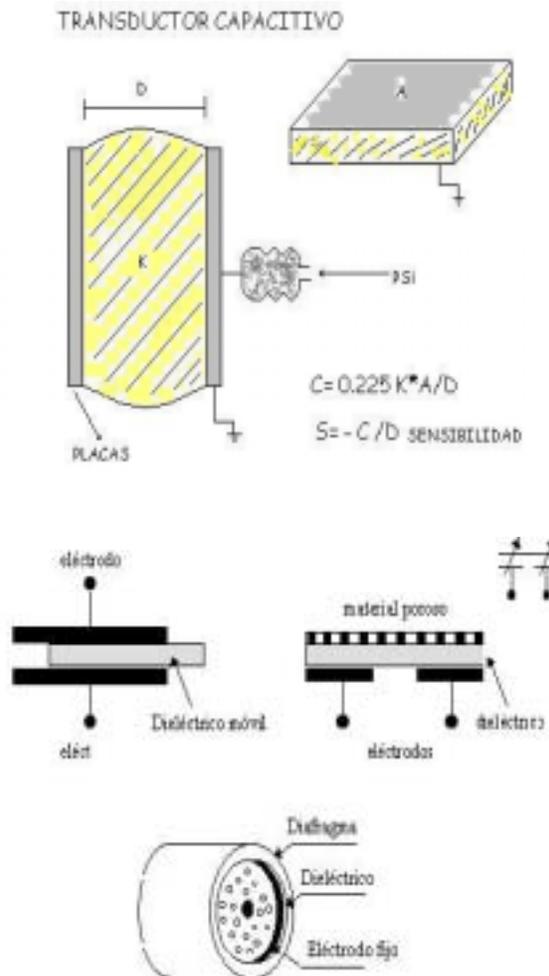
Figura 32. Sensores de diafragma



Los siguientes sensores de presión se basan en principios eléctricos; algunos convierten una deformación en un cambio de una propiedad eléctrica, otros convierten una fuerza en un cambio de una propiedad eléctrica.

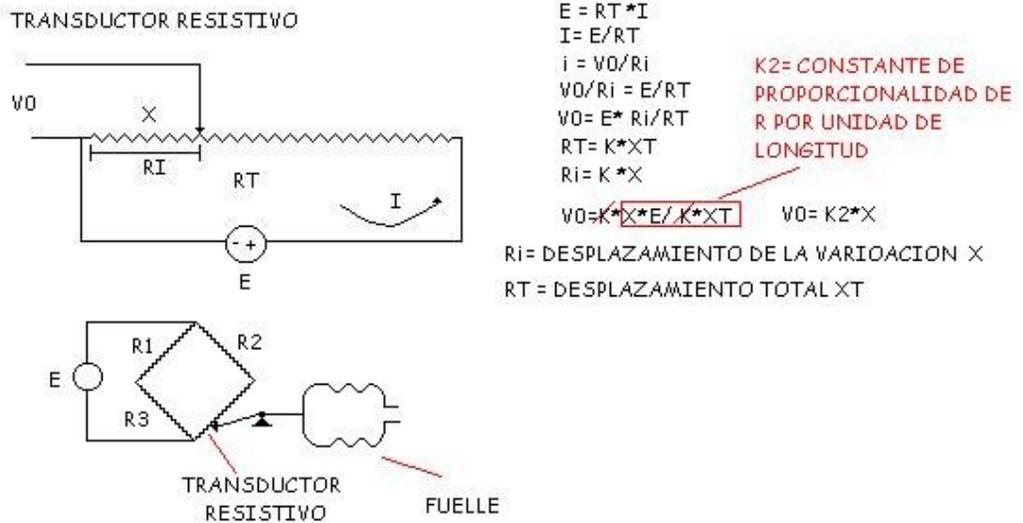
7.2.4 Capacitivo o inductivo. El movimiento asociado con uno de los sensores mecánicos descrito puede usarse para influir una propiedad eléctrica como la capacitancia que afecta una señal medida. Por ejemplo, bajo cambios de presión un diafragma causa un cambio en capacitancia o inductancia.

Figura 33. Sensores capacitivos



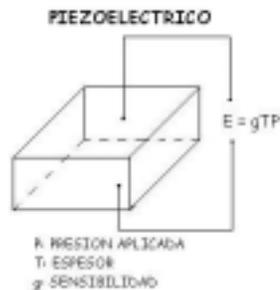
7.2.5 Resistivo, Celda de Carga (Strain Gauge). La resistencia eléctrica de un alambre de metal depende de la tensión aplicada al alambre. La desviación del diafragma debido a la presión aplicada causa tensión en el alambre, y la resistencia eléctrica puede medirse y relacionarse con la presión.

Figura 34. Sensores resistivos



7.2.6 Piezoeléctrico. Un material piezoeléctrico, como el cuarzo, genera un voltaje de salida cuando se le aplica una presión. La fuerza puede aplicarse al disco de cristal de cuarzo mediante un diafragma el cual se defleca mediante la presión de proceso.

Figura 35. Sensor piezoeléctrico



7.3 SENSORES DE FLUJO

La medición de flujo⁶ es crítica para determinar la cantidad de material comprado y vendido, en estas aplicaciones se requiere una medición de flujo muy exacta. Adicionalmente, los flujos a través del proceso deben ser regulados muy cerca del valor deseado con una variabilidad muy pequeña; en tales aplicaciones, usualmente es suficiente una buena reproducibilidad.

En la mayor parte de los medidores de flujo, la rata de flujo se determina inferencialmente mediante la medición de la velocidad del líquido o los cambios en la energía cinética. La velocidad depende de la presión diferencial que esta forzando el líquido a través de la tubería o el ducto. Debido a que el área transversal de la tubería es conocida y permanece constante, la velocidad promedio es buena indicación de la rata de flujo. La relación básica para determinar la rata de flujo de un líquido en tal caso es:

$$Q = V \times A$$

Donde Q = flujo de líquido a través de la tubería.

A = velocidad promedio del flujo

V = área transversal de la tubería.

Otros factores que afectan la rata de flujo de líquido son: la viscosidad del líquido, la densidad y la fricción del líquido en contacto con la tubería. La medición directa de fluidos puede hacerse con flujómetros de desplazamiento positivo. Estas unidades se mueven debido a incrementos específicos del líquido y el flujo total es la acumulación de los incrementos medidos, los cuales pueden ser contados por medios mecánicos o electrónicos.

⁶ Ver Carpeta de instrumentación en CD (PDF instr_industrial)

Otro factor que afecta el desempeño de los flujómetros es el número de Reynolds que es una unidad adimensional y se define como la relación entre las fuerzas inerciales del líquido y las fuerzas de arrastre.

$$R = (3160 \times Q \times Gt) / (D \times \mu)$$

Donde, R = número de Reynolds

Q = tasa de flujo del líquido en galones por minuto (gpm)

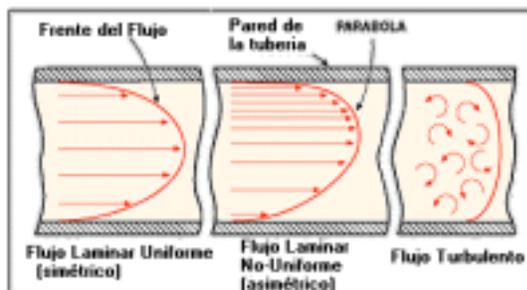
Gt = gravedad específica del líquido

D = diámetro de la tubería en pulgadas

μ = viscosidad del líquido en centipoises (cp)

La tasa de flujo del líquido y la gravedad específica son fuerzas inerciales y el diámetro de la tubería y la viscosidad del líquido son fuerzas de arrastre; el diámetro y la gravedad específica permanecen constantes en la mayoría de las aplicaciones en líquidos. A muy bajas velocidades o altas viscosidades, R es bajo y el líquido fluye en capas lisas con la velocidad más alta en el centro de la tubería y bajas velocidades en la pared de la tubería donde las fuerzas viscosas lo restringen; este tipo de flujo es llamado flujo laminar, los valores de R están por debajo de 2000 para este tipo de flujo.

Figura 36. Tipos de flujo



Hay aplicaciones que involucran un flujo turbulento con valores de R por encima de 3000, este flujo corre a altas velocidades o bajas viscosidades; el flujo rompe en remolinos turbulentos que fluyen a través de la tubería a la misma velocidad promedio. La velocidad del fluido es significativa y el perfil de velocidad es mucho más uniforme.

Existe una zona de transición entre el flujo turbulento y el flujo laminar. Dependiendo de la tubería y de las condiciones de instalación el flujo puede ser laminar o turbulento.

La mayoría de los sensores de flujo requieren secciones rectas de tuberías antes y después del sensor; este requisito pone las restricciones en diseños de proceso aceptables, los cuales pueden compensarse parcialmente haciendo rectos los tramos de tubería antes y después del sensor.

Muchos de los medidores de flujo utilizan el principio de presión diferencial para determinar el flujo de un fluido; el uso de la presión diferencial para inferir la tasa de flujo de un fluido es bastante conocida en la industria. Los flujómetros de presión diferencial son las unidades más comunes usadas hoy en día; se estima que el 50% de las aplicaciones de medición de flujo utilizan este tipo de unidad.

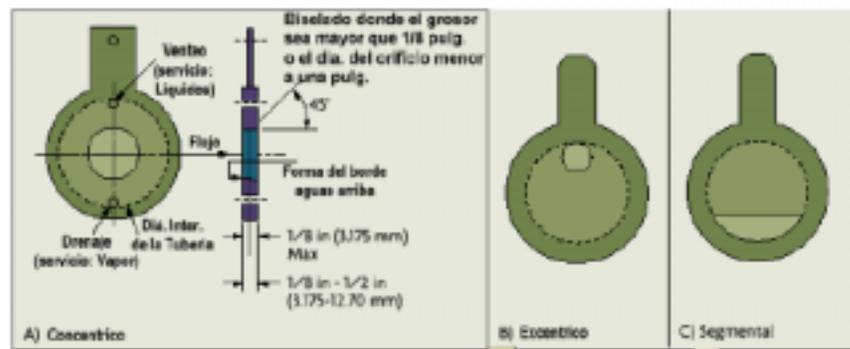
El principio Basoco de operación de los medidores de flujo de presión diferencial consisten en que la caída de presión a través del medidor es proporcional a la raíz cuadrada de la tasa de flujo. La tasa de flujo se obtiene a partir de la medición de la presión diferencial y posterior extracción de la raíz cuadrada.

Los flujómetros de presión, al igual que muchos flujómetros, tienen un elemento primario y uno secundario; el primario ocasiona un cambio en la energía cinética, lo cual provoca un cambio en la presión diferencial del tubo; el elemento secundario se encarga de medir el cambio en la presión diferencial convirtiéndolo

en una señal o lectura que representa el valor real de flujo. Dentro de estos medidores se encuentran los siguientes:

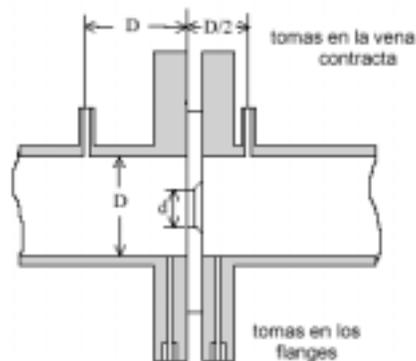
7.3.1 Medidor de placa orificio. Es uno de los flujómetros de líquidos más populares usados hoy en día. La placa orificio es simplemente una placa de metal perforada que se instala en la tubería, dicho orificio puede ser concéntrico, excéntrico, cónico o segmental.

Figura 37. Medidores de placa orificio



En la placa orificio el elemento primario es el orificio que constriñe el flujo del líquido para producir una presión diferencial a través de la placa. Se usan tomas de presión a cada lado de la placa para detectar la diferencia, estas tomas pueden tener diferentes posiciones.

Figura 38. Placa orificio con tomas en la vena contracta o en los flanges



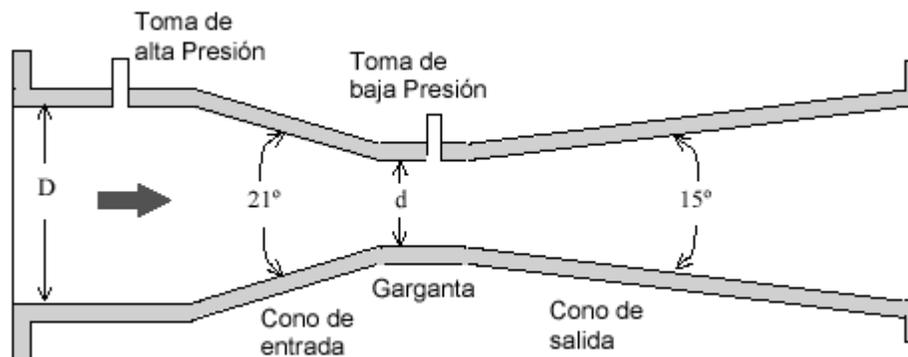
La mayor ventaja de la placa orificio es que no tiene partes móviles y su costo no se incrementa significativamente con el tamaño de la tubería, además de que no necesita adaptaciones especiales para colocarlas en la tubería, por lo general están placas se montan a través de bridas o flanges. Requiere de un tramo recto aguas arriba de longitud entre 10 y 30 veces el diámetro de la tubería.

La exactitud de los flujómetros de orificios depende de las condiciones de instalación, del área del orificio y de las propiedades físicas del fluido que está siendo medido. La precisión obtenida con la placa es del orden del 1 al 2%.

La placa orificio concéntrica es recomendada cuando se manejan flujos de vapor, líquidos y gases limpios con un número de Reynolds entre 2×10^4 hasta 10^7 .

7.3.2 Tubo venturi. Permite la medición de caudales 60% superiores a los de la placa orificio en las mismas condiciones de servicio y con una pérdida de carga de sólo 10 a 20% de la presión diferencial. Su precisión es alta y permite el paso de fluidos con un porcentaje relativamente grande de sólidos.

Figura 39. Tubo Venturi



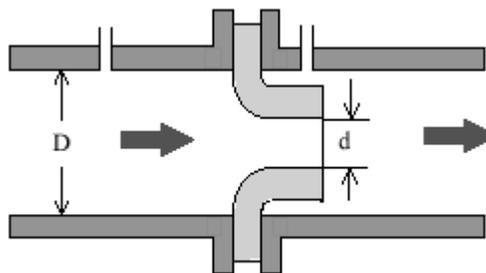
Es esencialmente una sección de tubería con una entrada estrecha y una garganta recta; como el líquido pasa a través de la garganta, su velocidad se

incrementa, ocasionando una presión diferencial entre la región de entrada y la salida.

Este medidor no tiene partes móviles y puede ser utilizado con muchos líquidos incluso con aquellos que presenten gran contenido de sólidos. Requiere de un tramo recto aguas arriba de longitud entre 5 y 20 veces el diámetro de la tubería.

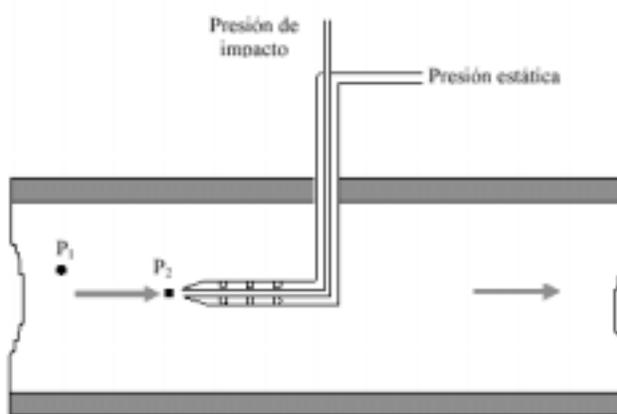
7.3.3 Toberas. Se sitúa en la tubería con dos tomas, una anterior y la otra en el centro de la sección más pequeña. Permite caudales 60% superiores a los de la placa orificio en las mismas condiciones de servicio. Los líquidos con sólidos suspendidos pueden ser medidos también, sin embargo no es recomendable su uso en líquidos altamente viscosos o que contengan grandes cantidades de sólidos.

Figura 40. Medidor de flujo tipo Tobera



7.3.4 Tubo Pitot. Mide la diferencia entre la presión total y la estática, es decir, la presión dinámica, la cual es proporcional a la velocidad. El tubo pitot es sensible a las variaciones en la distribución de velocidades en la sección de la tubería, de aquí que se emplee en flujos laminares. La máxima exactitud en la medida se consigue efectuando varias medidas en puntos determinados y promediando las velocidades medidas. Su precisión es del orden del 3 al 5%, y se emplea normalmente en grandes caudales de fluidos limpios con baja pérdida de carga.

Figura 41. Tubo Pitot



El tubo Pitot requiere de un tramo recto, aguas arriba, de longitud entre 20 y 30 veces el diámetro de la tubería.

$$\frac{P_2}{\rho} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2}$$

La ecuación correspondiente es:

P2 = presión de impacto en el punto donde el líquido anula su velocidad

P1 = presión estática absoluta del fluido

ρ = densidad

V1 = velocidad del fluido en el eje del impacto

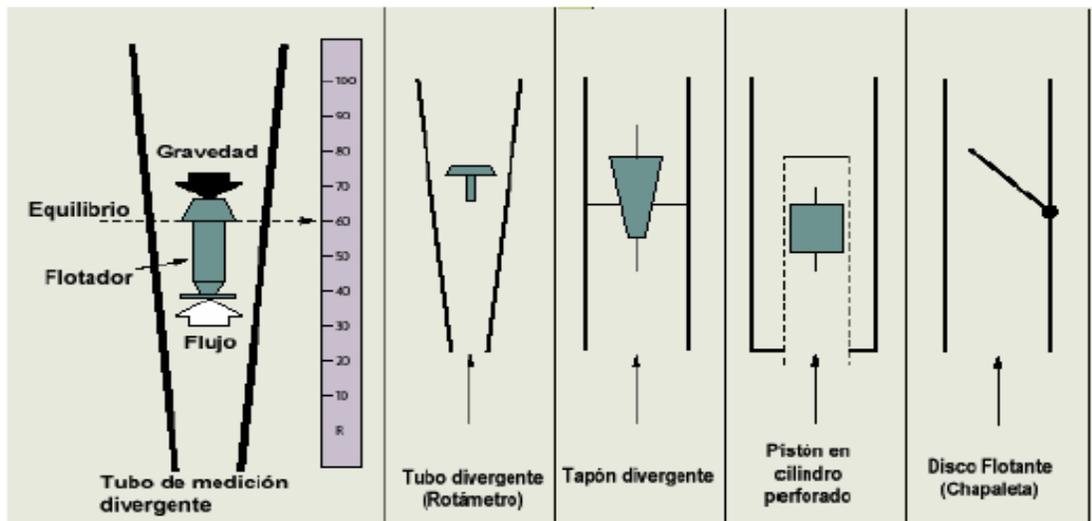
$$V_1 = \sqrt{\frac{(P_2 - P_1) \cdot 2}{\rho}}$$

Entonces:

Existen otros medidores de flujo que no utilizan el principio de presión diferencial, que también son utilizados en la industria, que utilizan otros principios para efectuar la medición (área variable, desplazamiento, etc.) tales como:

7.3.5 Rotametros. Los rotametros consisten esencialmente en un tubo estrecho y un flotador que cambia su posición proporcionalmente al caudal.

Figura 42. Medidor de flujo de área variable (rotámetro)



Su operación se basa en el principio de área variable, mediante el cual, el fluido levanta el flotador a través del tubo estrecho, aumentando el área para el paso del fluido. A mayor flujo, mayor es la elevación del flotador; la altura del flotador es directamente proporcional al valor del flujo. Su posición exacta es el punto donde la presión diferencial entre las superficies superior e inferior se balancea con el peso del flotador.

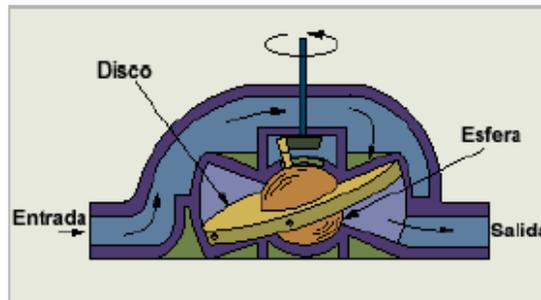
Debido a que la tasa de flujo puede ser leída directamente sobre una escala montada cerca del tubo, no es necesario un dispositivo secundario de lectura de flujo; pero si se desea, se puede utilizar un sensor automático para medir el nivel del flotador y transmitir una señal de flujo. El rotámetro siempre debe montarse y orientarse verticalmente, ya que la posición del flotador es dependiente de la gravedad. Los tubos de los rotámetros se fabrican en vidrio, metal o plástico; y los diámetros varían desde 0.25 hasta 6 pulgadas.

7.3.6 Medidores de desplazamiento positivo. Estos medidores miden el caudal en volumen contando o integrando volúmenes separados del líquido. Las partes mecánicas del instrumento se mueven aprovechando la energía del fluido dando

lugar a una pérdida de presión. La precisión depende de la tolerancia con que se fabrican las piezas mecánicas y del tamaño del instrumento. Existen tres tipos básicos de estos medidores:

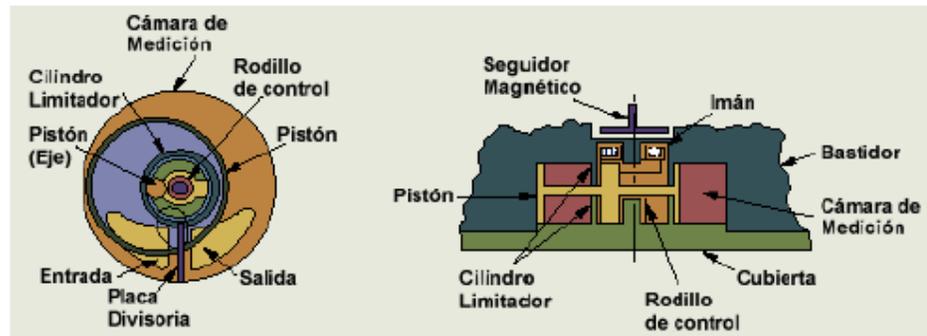
7.3.6.1 Medidor de disco oscilante. Dispone de un disco plano móvil montado sobre una esfera concéntrica localizada en la cara plana de una cámara circular; cuando el fluido pasa el disco toma un movimiento de balanceo que hace rotar un eje conectado a un contador, cada vuelta es proporcional a la cantidad específica de flujo.

Figura 43. Medidor de disco oscilante



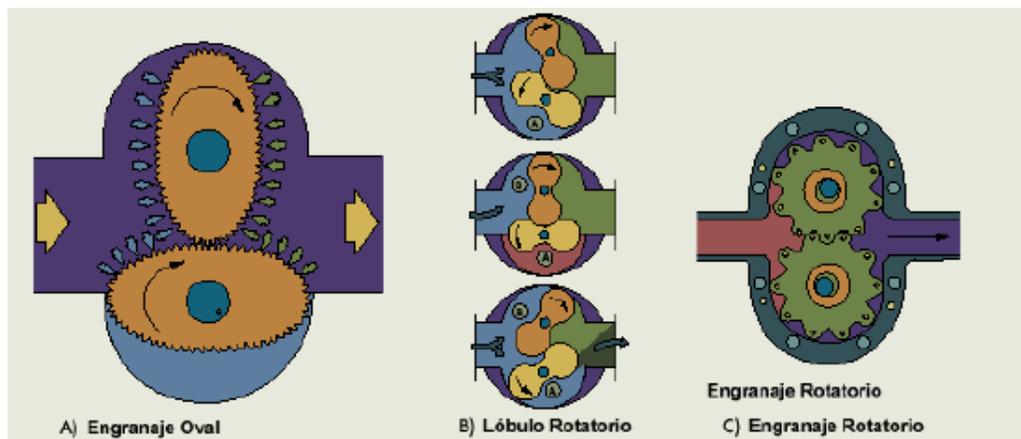
7.3.6.2 Medidor de piston oscilante. Se compone de una cámara cilíndrica con una placa divisoria que separa los orificios de entrada y de salida. La única parte móvil es un pistón cilíndrico que oscila suavemente en un movimiento circular entre las dos caras planas de la cámara; este pistón se monta sobre la placa divisoria a través de una ranura, esta unión sirve de guía para el movimiento oscilante del pistón. El movimiento del pistón es transmitido magnéticamente al exterior de la pared de la cámara en donde es sentido por un sensor de efecto may o por un magneto seguidor.

Figura 44. Medidor de pistón oscilante



7.3.6.3 Medidor de engranajes ovals. Disponen de dos engranajes ovals que giran debido a la presión diferencial creada por el líquido. También se pueden presentar en la forma de lóbulos rotatorios o de engranajes rotatorios. La acción del líquido produce un giro suave de par casi constante, que es transmitido al exterior a un sensor de efecto Hall o a un contador mecánico

Figura 45. Medidor de engranajes ovals



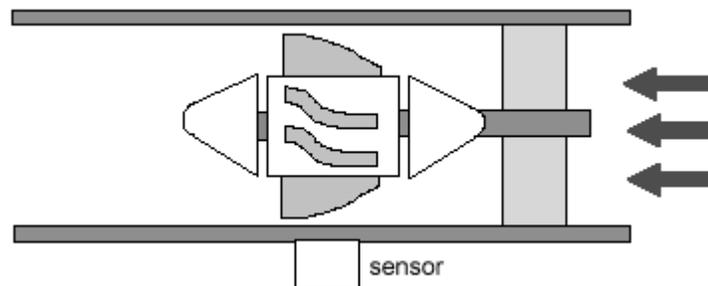
7.3.7 Medidores de velocidad. Estos instrumentos operan linealmente con respecto al volumen de la rata de flujo. Debido a que su relación no es cuadrática, los rangos disponibles son mayores. Los medidores de velocidad tienen una muy baja sensibilidad a los cambios de viscosidad cuando son usados con numero de

Reynolds mayores a 10000. muchos medidores de este tipo de están equipados con bridas (flanges) que permiten su conexión directa a las tuberías.

7.3.8 Medidores de turbina. Consisten en un rotor ubicado entre dos conos (posterior y anterior) que gira al paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal, la velocidad del fluido ejerce una fuerza de arrastre en el rotor; la diferencia de presiones debida al cambio de área entre el rotor y el cono posterior ejerce una fuerza igual y opuesta; de este modo el rotor queda equilibrado hidrodinámicamente y gira entre los conos anterior y posterior sin necesidad de utilizar rodamientos axiales evitando así un rozamiento adicional.

La velocidad de rotación es directamente proporcional al flujo y puede ser medida por un detector inductivo, por una celda foto eléctrica o por engranajes, los pulsos eléctricos pueden ser contados y totalizados.

Figura 46. Medidor de turbina

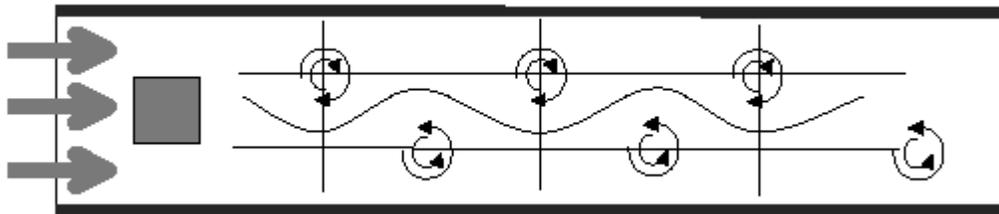


El numero de pulsos contados en un periodo de tiempo dado es directamente proporcional al flujo de volumen; un tacómetro se puede añadir al medidor de flujo de turbina para medir la velocidad rotacional y determinar la rata de flujo.

Los medidores de turbina tienen buena exactitud particularmente con líquidos de baja viscosidad.

7.3.9 Medidor de torbellino o vortex. Este medidor se basa en un fenómeno natural llamado esparcimiento de vortice, que ocurre cuando un liquido fluye a través de un cuerpo escarpado. Los torbellinos o vortices se forman alternativamente entre las superficies inferior superior moviéndose corriente abajo. La frecuencia del esparcimiento entre vortices es proporcional a la velocidad del fluido.

Figura 47. Medidor de torbellino (Vortex)



La detección de la frecuencia de los vortices se puede realizar por sensores piezoeléctricos o térmicos colocados en el cuerpo escarpado o en sus proximidades, o también por sensores ultrasónicos colocados en la superficie exterior de la tubería.

7.3.10 Medidores electromagnéticos. La operación de estos medidores se basa en la ley de Faraday, la cual establece que el voltaje a través de cualquier conductor que se mueve en un campo magnético es proporcional a la velocidad del conductor.

La fórmula de la ley de Faraday: $E = K \cdot B \cdot V \cdot D$

donde:

E : tensión inducida

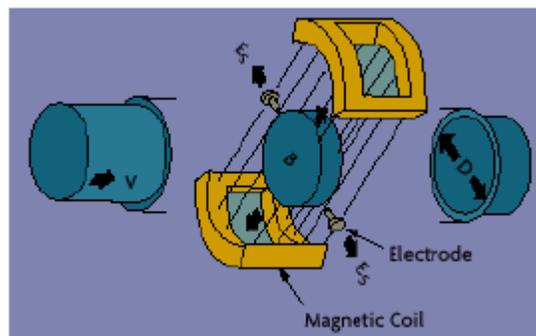
B : Campo magnético

D : Diámetro de la Tubería (Distancia entre electrodos)

V : Velocidad del conductor (velocidad del fluido conductor)

Estos medidores presentan baja pérdida de presión, no tienen partes móviles, son de alta precisión, tienen salida lineal, son insensibles a la gravedad específica, a la viscosidad, a la presión y a la temperatura, también están en capacidad de medir amplios rangos de fluidos difíciles de medir por otros medidores (líquidos viscosos, pastas aguadas, fangos, etc.). Para aplicar este principio a la medición de flujo es necesario establecer que el líquido que está siendo medido debe ser conductor.

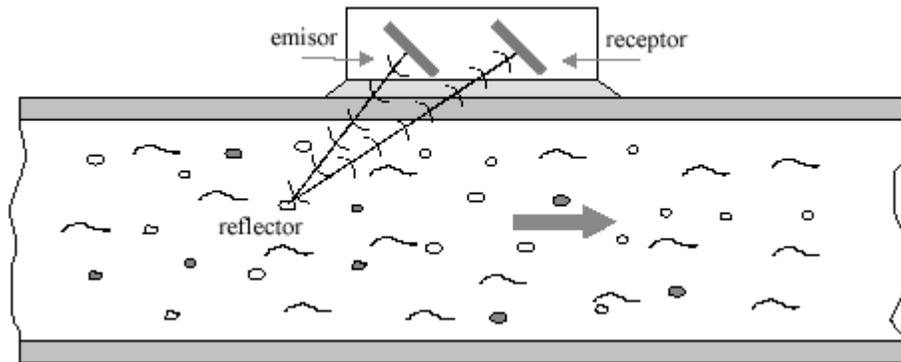
Figura 48. Medidor electromagnético de flujo



7.3.11 Medidores ultrasónicos de flujo. Los medidores ultrasónicos de flujo utilizan sensores que se fijan al exterior de la tubería, es decir, que no se introducen en ella, lo cual los hace particularmente útiles para medir flujos multifásicos. Se dividen en dos tipos: los medidores de efecto Doppler y los medidores de tiempo de tránsito.

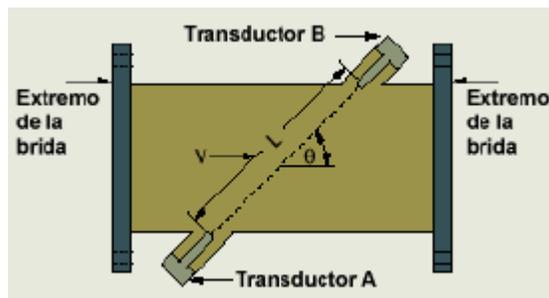
7.3.11.1 Medidor de efecto Doppler. Este medidor es completamente externo a la tubería y utiliza un cristal piezoeléctrico para emitir una onda ultrasónica, a un ángulo con respecto a la velocidad del fluido. Las burbujas, las partículas sólidas o los remolinos en la corriente de flujo dispersan la onda sonora incidente en todas direcciones, pero una pequeña porción se dispersa hacia atrás en la dirección del cristal receptor. La frecuencia de la señal de retorno está desfasada con respecto a la frecuencia emitida, y este desfase es proporcional a la velocidad del fluido.

Figura 49. Medidor ultrasónico de efecto Doppler



7.3.11.2 Medidor de flujo ultrasónico de tiempo de tránsito. El medidor de tiempo de tránsito tiene transductores montados a cada lado de la tubería. La configuración es tal que la onda sonora viaja entre los dispositivos que están a 45° de la dirección del flujo de fluido. La velocidad de la señal viajera entre los transductores aumenta o disminuye con la dirección de transmisión y la velocidad del líquido que está siendo medido. El tiempo diferencial que es proporcional al flujo, se obtiene transmitiendo la señal alternativamente en ambas direcciones. Una limitación de los medidores de tiempo de viaje es que los líquidos que están siendo medidos deben estar relativamente libres de burbujas de gas o sólidos en suspensión que minimizan la señal o la absorben.

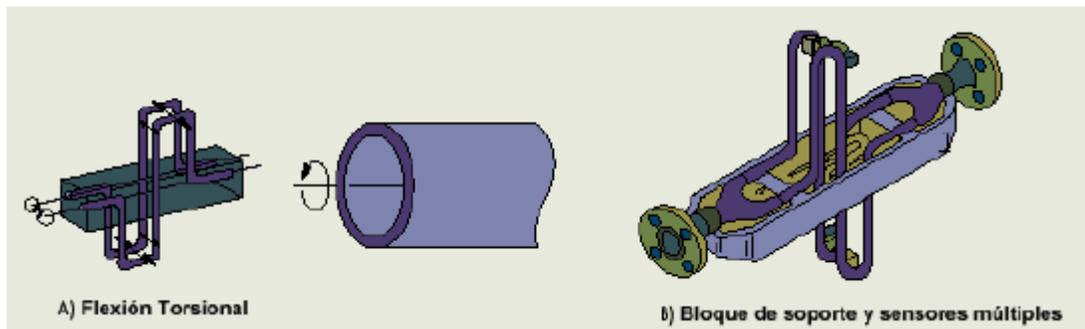
Figura 50. Medidor de flujo ultrasónico de tiempo de tránsito



7.3.12 Medidores de flujo másico. Los líquidos tales como el petróleo crudo, el gas natural y los productos de hidrocarburos se transfieren a menudo de una empresa a otra a través de tuberías. Puesto que los productos se compran y se venden en unidades de masa, es fundamental conocer con precisión la masa del fluido que se ha transferido en un tiempo determinado. Varios diseños están disponibles, pero uno de los más comúnmente utilizados es el medidor de Coriolis.

7.3.12.1 Medidor de Coriolis. Los medidores de Coriolis son verdaderos medidores de masa que miden la rata de masa o flujo directamente, a diferencia de los medidores de flujo volumétricos. Debido que la masa no cambia, el medidor es lineal y no hay necesidad de ajustes por variación en las propiedades del líquido. Esto elimina la necesidad de compensación por cambios en las condiciones de temperatura o presión. El medidor es especialmente útil para medir líquidos en los cuales varía la viscosidad con la velocidad, a temperaturas y presiones dadas. Los medidores de Coriolis están disponibles en varios diseños.

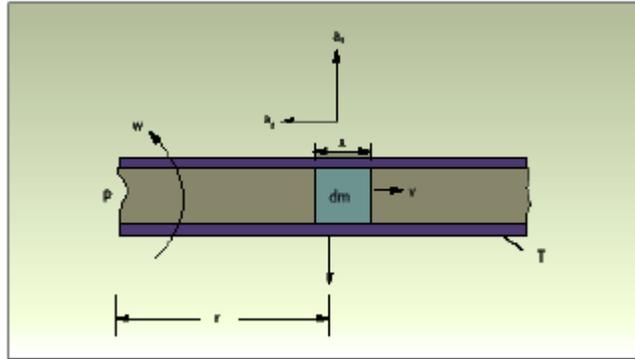
Figura 51. Diseños de los medidores de Coriolis



Un modelo muy popular consiste en un tubo en forma de U encerrado en una caja sensora y conectado a una unidad electrónica. El medidor se basa en el efecto de aceleración de Coriolis, que consiste en que si un cuerpo de masa m se desplaza con velocidad lineal V sobre una barra giratoria que gira con velocidad angular $\dot{\omega}$, experimenta una fuerza de Coriolis de magnitud: $F = 2 m w v$

La dirección de ésta fuerza es perpendicular a los vectores de velocidad lineal v y velocidad angular w .

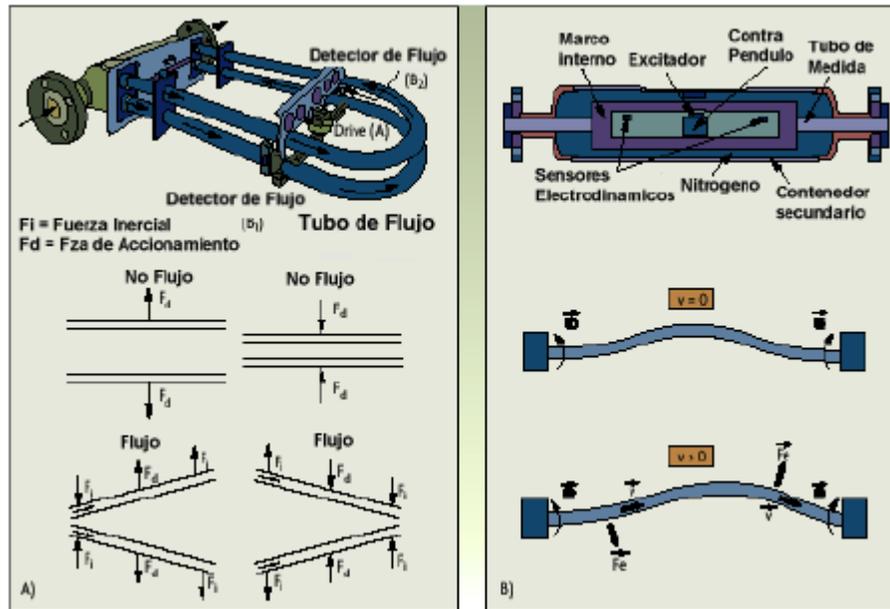
Figura 52. Efecto Coriolis



La fuerza de Coriolis se puede producir invirtiendo las velocidades lineales del fluido mediante la desviación de un bucle en forma de U en estado de vibración controlada a la frecuencia de resonancia.

La vibración del tubo perpendicular al sentido de desplazamiento del fluido, crea una fuerza de aceleración en la tubería de entrada del fluido y una desaceleración en la de salida, con lo que se genera un par cuyo sentido va variando de acuerdo con la vibración y con la velocidad del fluido circulante. El par de fuerzas origina un ángulo de torsión en el tubo, el cual es directamente proporcional a la masa instantáneamente de fluido circulante.

Figura 53. Deflexión del tubo sometido a la vibración y a la fuerza del fluido en el medidor de Coriolis de dos tubo y en el de tubo recto



7.3.13 Medidor de flujo de masa electrónico. Este medidor opera con una menor dependencia de la densidad, presión y viscosidad del fluido medido. Utiliza un elemento sensor caliente y los principios termodinámicos de transmisión de calor para determinar la verdadera rata de flujo másico. Como los gases reales no cumplen exactamente la ley de los gases ideales:

PV = nRT, donde:

P = Presión del gas.

n = número de moléculas (masa)

V = Volumen que ocupa el gas

R = Constante de los gases Ideales

T = Temperatura del gas.

Mediante la ley ISO de gases ideales podemos calcular el volumen que una cierta masa de gas ocupará bajo ciertas condiciones específicas, pero si la presión del

gas aumenta, con la temperatura constante, el volumen aumenta. Si la temperatura aumenta y el volumen permanece constante, la temperatura aumentará. La única variable que permanece constante es la masa del gas.

El flujo másico es la medida de la rata de flujo de gas (Kg / s), sin embargo el gas se mide en m³ /s, pero como el volumen depende la presión y la temperatura, se hace necesario establecer condiciones estándares de presión y temperatura para definir la rata de flujo volumétrico. Normalmente estas condiciones son 20 ° F y 1 atmósfera. Es posible entonces convertir un flujo de gas dado en lb/h en pies cúbicos estándar por minuto mediante la siguiente relación:

$Q_s = m' / (\rho) s$. Donde:

Q_s = Rata de flujo másico estándar

m' = Rata de flujo másico

$(\rho) s$ = Densidad del gas en condiciones estándar.

En muchos casos solo se conoce la rata de flujo volumétrico referenciada a las condiciones reales de la tubería. Para convertir los pies cúbicos por minuto reales a pies cúbicos estándar por minuto se usa la siguiente relación:

$Q_s = Q_a (P_a / P_s) (T_a / T_s)$,

donde:

P_a = Presión real,

P_s = Presión estándar

T_a = Temperatura real,

T_s = Temperatura estándar

Existen básicamente dos tipos de medidores de flujo de masa electrónicos: El tipo sonda de inmersión y el tipo de tubo calentado. Este último recibe todo el gas o

parte del mismo y lo calienta mediante un calentador del tipo resistivo, mientras que dos detectores de temperatura resistivos calientan y sensan la temperatura del tubo. Como se presenta la transferencia de una cierta cantidad de calor desde el primer sensor hacia el gas, el segundo sensor transferirá menos calor al gas que fluye y esto permite establecer una diferencial de temperatura entre los dos sensores que es medida mediante un puente Wheastone. Esta diferencia de temperatura entre los dos sensores es proporcional al flujo de gas.

7.4 SENSORES DE NIVEL

El nivel es una variable muy importante en los procesos ya que esta vinculada a la operación del equipo, al inventario, etc. Lo más común es designar con nivel a la posición de la interfase líquido – gas o gas – molido, pero también se suelen medir las interfases líquido – líquido y líquido – sólido.

El nivel de un líquido en un recipiente debe mantenerse por encima de la tubería de salida porque si el recipiente se queda vacío, el flujo de salida se hará cero, esta es una situación que perturbará los procesos aguas abajo y podría dañar cualquier equipo de bombeo que requiera del líquido. El nivel tampoco debe desbordarse (derramarse) en un recipiente abierto, ni debe salir a través de una línea de vapor en un recipiente cerrado ya que podría perturbar un proceso diseñado para vapor. Además, el nivel puede influir en el desempeño de un proceso.

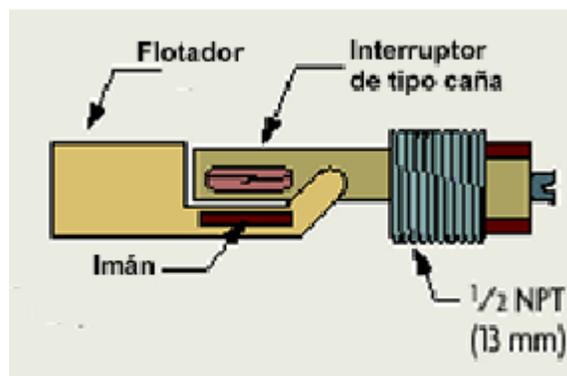
No existe algo así como un medidor universal que sea aplicable o todos o a la mayoría de los casos. Cada situación debe ser cuidadosamente analizada, ya que existe un sin numero de condiciones a tener en cuenta como tipo de sólidos o fluidos, agresividad física o química, existencia de espuma, ángulos de talud en sólidos, etc.

Los sensores de nivel pueden ubicarse en los recipientes que contienen el líquido o en una pierna externa que actúa como manómetro. Cuando el flotador y los sensores se colocan en el recipiente, se ubican normalmente en una cámara de amortiguamiento que reduce los efectos del flujo en el recipiente

La medición del nivel puede ser dividida en dos categorías: medición de nivel puntual y medición de nivel continuo. Los sensores de nivel puntual simplemente registran una altura de líquido discreta. Generalmente se utilizan para generar alarmas por sobrellenado o bajo nivel. Un sensor continuo, por su parte monitorea continuamente el nivel dentro de un amplio margen, entregando una salida analógica que está directamente correlacionada con el nivel de la sustancia contenida en el tanque.

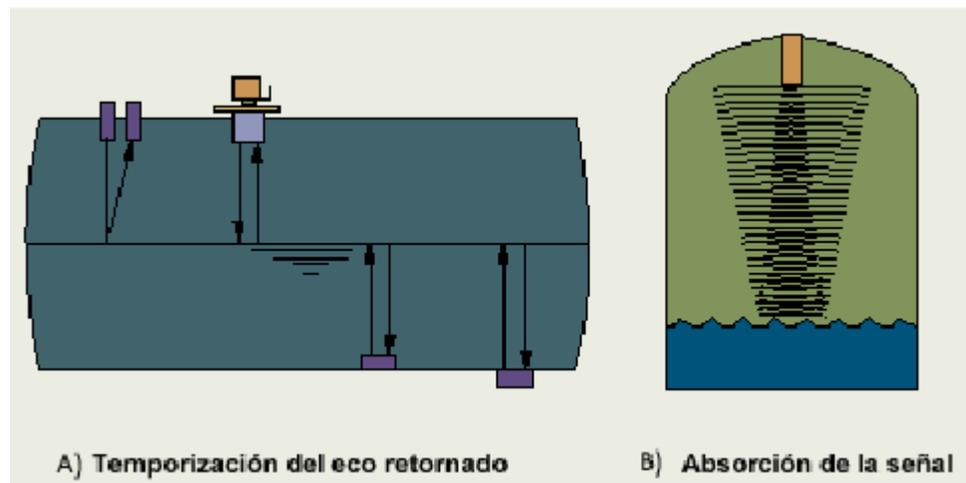
7.4.1 Interruptor flotante. Este consiste en un imán equipado con flotador, el cual se mueve directamente con la superficie del líquido y acciona un “reed switch” o **interruptor de caña o de lengüeta**. Tanto el imán como el “reed switch” se encuentran herméticamente sellados para garantizar su funcionamiento óptimo en una variedad de medios.

Figura 54. Interruptor flotante



7.4.2 Sensores ultrasónicos sin contacto. Los sensores ultrasónicos sin contacto consisten de los siguientes elementos: sensor, procesador de señales análogas, microprocesador, interruptor de rango BCD y circuito de salida. El microprocesador genera una serie de impulsos, que son transmitidos en forma de sonidos por el sensor hacia la superficie de nivel. El eco que retorna de la superficie es detectado por el sensor y regresado hacia el microprocesador, el cual procesa la señal en forma digital como una representación de la distancia entre el sensor y la superficie de nivel. El microprocesador almacena el valor de la distancia por medio de una técnica de promedio móvil, que en conjunto con un filtro digital permiten rechazar señales espúreas y de ruido.

Figura 55. Sensor ultrasónico sin contacto

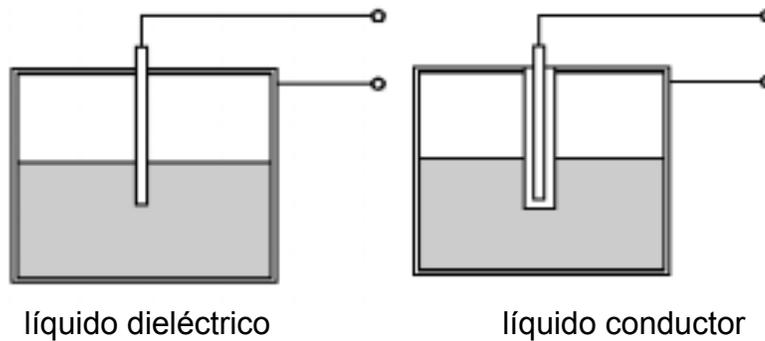


7.4.3 Sensores capacitivos. Se basan en las características eléctricas del fluido; estos miden la capacidad del condensador formado por el electrodo sumergido en el líquido y las paredes del tanque. La capacitancia del conjunto depende linealmente del nivel del líquido.

En fluidos no conductores se emplea un electrodo normal y la capacitancia total del sistema incluye la del líquido, la del gas superior y la de las conexiones.

En fluido conductores, el electrodo está aislado usualmente con teflón, e intervienen las capacitancias adicionales entre el material aislante y el electrodo en la zona del líquido y del gas.

Figura 56. Sensores de nivel capacitivos



7.4.4 Sensor de presión diferencial. El sensor de presión diferencial detecta la diferencia de presión entre el fondo y la parte superior del líquido, la cual es ocasionada por el peso de la columna de líquido.

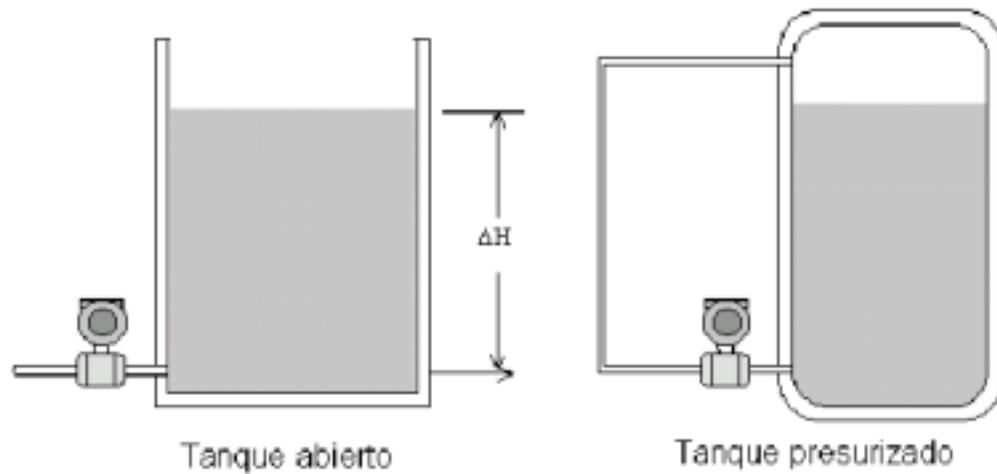
$$\Delta P = G \cdot \Delta H$$

donde:

G : gravedad específica del líquido,

ΔH : altura de la columna de líquido.

Figura 57. Sensor de nivel de presión diferencial



El extremo que detecta la presión en el fondo del líquido se conoce como extremo de alta presión, y el que se utiliza para detectar la presión en la parte superior del líquido, como extremo de baja presión. Una vez conocido el diferencial de presión y la densidad del líquido, se puede obtener el nivel.

Figura 58. Sensor de nivel de presión diferencial

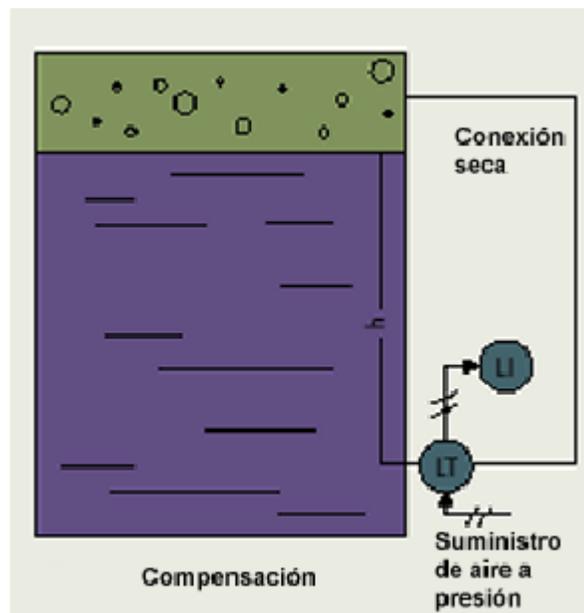


Figura 59. Sensor de nivel

sensor	límites de aplicación	exactitud	dinámica	ventajas	desventajas
flotador	1 m			1. usados como interruptores	1. no aplica para fluidos pegajosos que cubren el flotador
desplazamiento	0.3 a 3.0 m			1. buena exactitud	1. rango limitado 2. montaje costoso para altas presiones
presión diferencial	esencialmente sin límite superior			1. buena exactitud 2. rango grande 3. lechadas con líneas selladas	1. arena densidad constante 2. líneas selladas sensibles a la temperatura
capacitivo	30 m			1. aplicable para lechadas 2. interruptor de nivel para muchos fluidos difíciles	1. se afecta por variaciones en la densidad

7.5 SENSORES DE ANÁLISIS

El término analizador se refiere a cualquier sensor que mide una propiedad física de un material de proceso o de una sustancia de trabajo. Esta propiedad puede referirse a la pureza (por ejemplo, el porcentaje en mole de varios componentes), una propiedad física básica (por ejemplo, densidad o viscosidad) o una indicación de la calidad del producto, según lo requiera el cliente final (por ejemplo, octanaje de la gasolina o poder calorífico del combustible)

Los analizadores están basados en una amplia gama de principios físicos; si consideramos sus características unificadas se aumenta enormemente su complejidad cuando se compara con los sensores normales de temperatura, flujo, presión y nivel (T, F, P, y L). En muchas ocasiones, el analizador se localiza en un laboratorio centralizado y las muestras de los procesos son recogidas en la planta y transportadas al laboratorio. Este procedimiento reduce el costo del analizador, pero introduce grandes retardos antes de que una medición esté disponible para el uso en las operaciones de la planta.

Los analizadores pueden localizarse cerca del equipo de proceso para proporcionar medidas en tiempo real de las variables que se usarán en la operación y control de la planta. Obviamente, la disponibilidad de las variables claves del proceso (además de T, F, P, y L) proporciona la posibilidad de mejorar el desempeño dinámico, lo cual conduce a un aumento de la seguridad, una mayor calidad del producto y ganancias más altas. En general, estos beneficios se logran a expensas de un mayor costo de los sensores y de una confiabilidad más baja; de tal manera que el ingeniero debe realizar un análisis económico considerado los beneficios y costos antes de decidir instalar un analizador en línea.

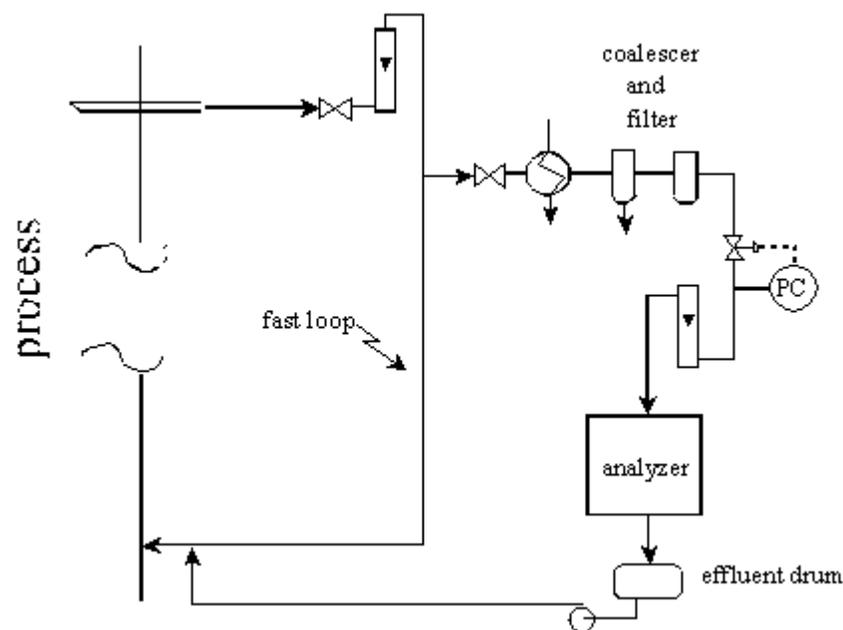
Un punto de vista alternativo involucra el control con retroalimentación de variables inferenciales (ver Marlin, Capítulo 17, 1995), quizás acopladas con análisis de laboratorio no tan frecuentes. Tanto los analizadores en línea como las variables inferenciales se usan ampliamente en las industrias de proceso; la selección apropiada del sensor y de la tecnología de control dependen de los costos y beneficios para cada aplicación específica.

Los analizadores en línea utilizan muchos principios físicos diferentes, y un estudio de estos analizadores requiere de mucho material de consulta y referencia, típicamente al menos un libro completo (por ejemplo, Clevert, 1985). En esta sección, se repasan algunos de los factores claves aplicables a muchos analizadores; estos factores son independientes de los principios físicos y químicos del analizador. Para muchos analizadores en línea, en general, el principal problema es la necesidad de un sistema muestreado.

El propósito de un sistema muestreado es extraer una muestra representativa del fluido, preprocesar el material para que el analizador pueda realizar su función, y disponer del efluente después de que el análisis se haya completado, un sistema muestreado típico se ilustra en figura. El diseño del muestreo contribuye a lograr el objetivo de extraer material representativo del total de las propiedades de la

sustancia que está siendo analizada. Típicamente, la sonda de muestreo (tubería por el cual fluye la muestra) tiene su apertura localizada cerca del centro geométrico de la línea de proceso. Estas aperturas pueden acomodarse para evitar la extracción de sólidos y gases indeseados. La rata de flujo de la muestra desde el proceso hasta el analizador debe ser muy alta aunque el analizador podría requerir solo una pequeña cantidad de material. Esto "lazo rápido" del flujo de la muestra previene un retraso grande de transporte, por ejemplo, un tiempo muerto en el sistema de muestra del analizador. Naturalmente, este diseño exige muestrear una cantidad grande de material, que debe devolverse al proceso por razones económicas y medioambientales.

Figura 60. Sistema Típico de muestreo para un analizador en línea



Una muestra más pequeña para el análisis se toma en el "lazo rápido". Esta muestra necesita ser preprocesada o "acondicionada" para asegurar que es aceptable para el analizador. Por ejemplo, la muestra podría ser calentada para

asegurar el flujo continuo de un material que se podría solidificar, o podría refrescarse para satisfacer límites del equipo analizador. Además, se regula la presión para asegurar que no se transmita una onda de presión grande del proceso a un analizador sensible. A menudo se usa un regulador de presión; éste es un sensor autocontenido que incorpora: controlador y válvula proporcional el cual nos provee una protección confiable y de bajo costo, pero un control poco exacto. Finalmente, puede ser ventajosa una separación física limitada con el fin de proteger el analizador; a menudo, se usa un filtro para quitar material particulado, y un coagulante puede separar componentes indeseados de líquidos, por ejemplo, el agua ocasional en un flujo de hidrocarburo.

Debe regularse también el flujo de la sustancia que alimenta al analizador. Este flujo podría ser continuo o periódico, dependiendo de los requisitos del analizador. Por ejemplo, un cromatógrafo requiere un flujo periódico y proporciona valores periódicos o discretos de la variable medida. Un flujo continuo podría regularse mediante un rotámetro, y un flujo periódico podría regularse por una valvula solenoide (on/off).

Todo el material del efluente, sea que se procese o no en el analizador, debe tener una disposición final adecuada. La mejor manera de tratar esta cuestión es devolver todo el material al proceso. Esto, requiere o un recipiente para la colección del material con una bomba que reinyecte este material al flujo del proceso, o un retorno al proceso en un punto con menor presión que el efluente del analizador. Si el material es ambientalmente benigno, puede ser vertido a la atmósfera o a la alcantarilla.

Dos fuentes adicionales de material son comunes. Para arranque, parada, y prueba de presión, se requiere una fuente de liquido limpio para llenar y limpiar el sistema. Para verificar el funcionamiento del analizador en línea, se prevee una fuente de fluido con propiedades conocidas (una muestra de calibración), y el personal de planta puede desviar la muestra del proceso y enviar una muestra de

prueba al analizador. Este procedimiento contribuye a desarrollar confianza en el analizador y a hacer mayor uso del valor medido al momento de tomar decisiones.

Finalmente, a menudo el analizador y equipo de muestreo se localizan físicamente cerca, a menudo dentro de un gabinete el cual puede ser de temperatura controlada. Esto proporciona protección para la electrónica sensible y el equipo de medida. Además, el gabinete proporciona una barrera entre la atmósfera en la planta que puede (incluso muy infrecuentemente) contener vapores explosivos y la electrónica de potencia necesaria para el analizador.

Claramente, un analizador en línea involucra un sistema complicado de control de flujo, de presión y de temperatura además del propio analizador. Como resultado, el costo de un analizador en línea instalado puede ser más de dos veces el costo del analizador para uso en laboratorio. Un costo adicional resulta del mantenimiento frecuente del analizador; una aproximación gruesa de esto es la siguiente: si consideramos un técnico que trabaja 40 horas por semana, este, puede mantener aproximadamente 10 - 15 analizadores en línea. Sin embargo, la medición y el control seguro de la calidad del producto proporcionan beneficios sustanciales los cuales justifican el costo total de muchos analizadores.

7.5.1 Densidad. La densidad o masa específica de un cuerpo se define como su masa por unidad de volumen, expresándose normalmente en g / cm^3 (Kg / m^3). Como la densidad varía con la temperatura y con la presión se especifica para un valor base de la temperatura que en líquidos suele ser de 0°C o de 15°C y en los gases de 0°C y para un valor estándar de la presión que en los gases es de 1 atmósfera.

En los procesos industriales la densidad es una variable cuya medida es a veces vital. Tal es el caso de la determinación de la concentración de algunos productos químicos como el ácido sulfúrico, la medida exacta del caudal en gases y vapores

que viene influida por la densidad, la medida de la densidad en un producto final nos garantiza las cantidades de los ingredientes que intervienen en la mezcla.

Entre los diversos métodos de medida de densidad figuran los siguientes: areómetros, método de desplazamiento, método de presión diferencial, refractómetro, radiación, método del punto de ebullición, medidores inerciales, etc. La mayoría de estos medidores utilizan las variables medidas como presión, temperatura, flujo para determinar la densidad de fluido, mediante fórmulas matemáticas.

7.5.1.1 Areómetros. Constan de un flotador lastrado en su parte inferior con un vástago superior graduado, este se sumerge hasta que su peso es equilibrado por el líquido que desaloja hundiéndose tanto más, cuanto menor sea la densidad del líquido.

7.5.1.2 Métodos de presión diferencial. En este sistema se fijan dos puntos en el tanque o en una tubería vertical del proceso y se les conecta un instrumento de presión diferencial, ya sea directamente o bien a través de una cámara de medida. Como la diferencia de altura en el líquido es fija, la única variable que altera la presión diferencial es la densidad; la presión diferencial medida por el instrumento es: $P = h \gamma g$ (densidad proporcional a la presión).

7.5.1.3 Método de desplazamiento. Emplea un instrumento de desplazamiento o barra de torsión, el flotador está totalmente sumergido en el líquido y está equilibrado exteriormente para que el par de torsión desarrollado represente directamente la densidad del líquido.

7.5.1.4 Refractómetro. Solo se utilizan en fluidos limpios. Consiste en una fuente luminosa de filamento de tungsteno que incide en el líquido con un ángulo determinado tal que la reflexión de luz pase a refracción; el haz luminoso se

enfoca en un prisma rotativo que barre el líquido del proceso; la refracción que se presenta cuando el rayo luminoso incide con el ángulo crítico se detecta con una célula fotoeléctrica y la señal es amplificada para su registro o control. El índice de refracción puede relacionarse con la concentración de sólidos del líquido, es decir, inferencialmente con la densidad.

7.5.1.5 Método de radiación. Se basa en la determinación del grado con que el líquido absorbe la radiación procedente de una fuente de rayos gamma. La radiación residual es medida con un contador de centelleo que suministra pulsos de tensión, cuya frecuencia es inversamente proporcional a la densidad.

7.5.1.6 Método de punto de ebullición. En este método se mide la diferencia de temperatura entre el punto de ebullición del líquido que se está concentrando y el punto de ebullición del agua en las mismas condiciones de presión; esta diferencia de temperaturas es función de la densidad del líquido y se mide mediante sondas de resistencias una en el líquido y la otra en el agua, conectadas a un instrumento diferencial de puente de Wheatstone graduado directamente en densidad.

7.5.1.7 Medidores inerciales. Se basan en el aprovechamiento de la variación de la masa inercial de una masa inmersa en el fluido al entrar la misma en vibración dentro de una cámara de volumen constante; las variaciones de densidad del fluido contribuyen a una carga inercial de la masa, variando su masa efectiva. Como la frecuencia natural de un elemento depende de su masa efectiva, se sigue que midiendo la frecuencia natural o resonancia de la masa inmersa, se tendrá una medida correlacionada de la densidad del fluido, se debe compensar la temperatura del fluido.

7.5.2 Viscosidad. La viscosidad y la consistencia son términos que usualmente se le aplican a los fluidos y que representan la resistencia que ofrecen al flujo o a la deformación cuando están sometidos a un esfuerzo constante. Viscosidad es la resistencia que ofrece el fluido al movimiento entre dos placas paralelas separadas por una distancia de unidad, una de las placas es fija y la otra móvil la cual se mueve con una velocidad.

Los instrumentos utilizados para medir la viscosidad son los viscosímetros, estos pueden ser de dos clases, los viscosímetros discontinuos y los viscosímetros continuos. Los viscosímetros discontinuos se basan en:

- Medir el tiempo que emplea un volumen dado del fluido para descargar a través de un orificio, este orificio puede sustituirse por un tubo capilar.
- Tiempo de caída de una bola metálica o de ascensión de una burbuja de aire en el seno del fluido contenido en un tubo o bien de caída de un pistón en un cilindro.
- Par de resistencia de un elemento estacionario en una taza rotativa que gira a velocidad constante. El par se mide por el desplazamiento angular de un resorte calibrado unido al elemento fijo.

Dentro de los viscosímetros continuos que permiten el control de la viscosidad se encuentran los siguientes:

- Caída de presión producida por un tubo capilar al paso del fluido que se bombea a caudal constante; dos tomas situadas antes y después del tubo capilar se conectan a un transmisor de presión diferencial neumático o electrónico.
- Par de torsión necesario para hacer girar un elemento en el fluido, este elemento de forma dada gira a través de un resorte calibrado por medio de un motor sincrónico. El ángulo de desviación en el movimiento entre el eje del motor y el elemento inmerso en el fluido es proporcional a la viscosidad; este ángulo se mide en desplazamiento de contactos o en variación de resistencia o capacidad.

- Rotámetro con flotador sensible a la viscosidad, se mantiene un caudal constante del fluido con lo que la posición del flotador depende de la viscosidad. Al rotámetro se le puede acoplar un transmisor neumático o electrónico.
- Vibraciones o ultrasonidos, se mide la energía necesaria para excitar una probeta en vibración continua o que vibra ultrasonicamente en el seno del fluido.

8. INSTRUMENTOS INDICADORES

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

8.1 INDICADORES DE PRESIÓN

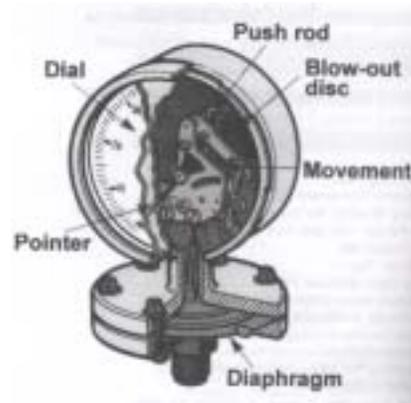
Figura 61. Manómetro (PI)



Figura 62. Manómetro de sello.



Figura 63. Constitución de un manómetro de sello

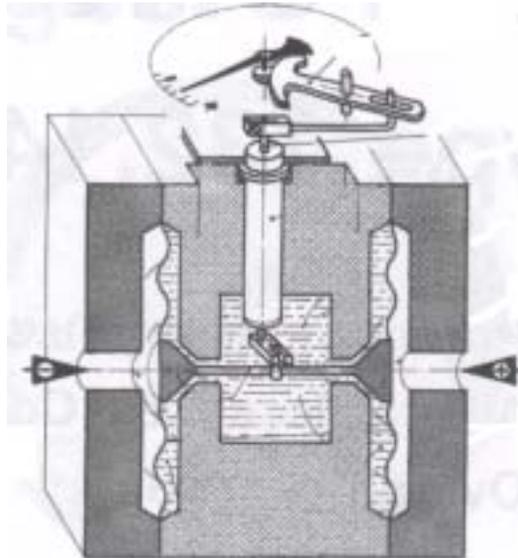


8.2 INDICADOR DE PRESION DIFERENCIAL

Figura 64. Indicador de presión diferencial



Figura 65. Constitución de un indicador de presión diferencial



8.3 INDICADORES DE TEMPERATURA

Figura 66. Indicador de temperatura

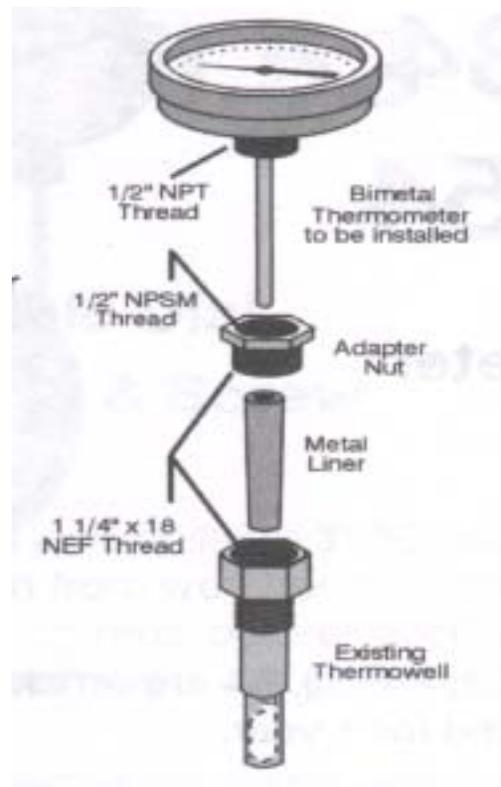


Figura 67. Indicador de temperatura

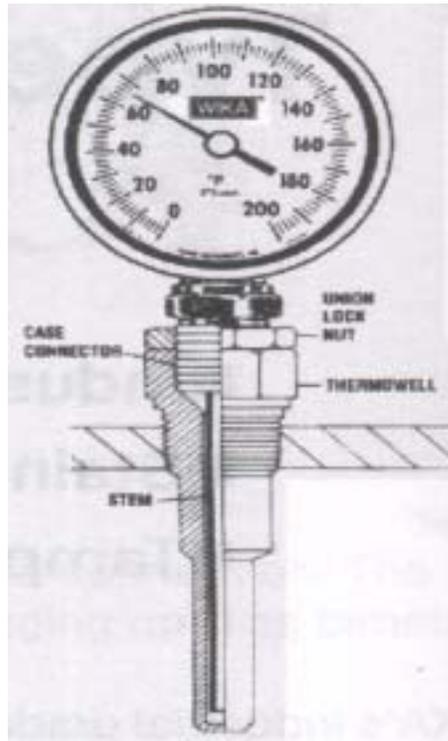
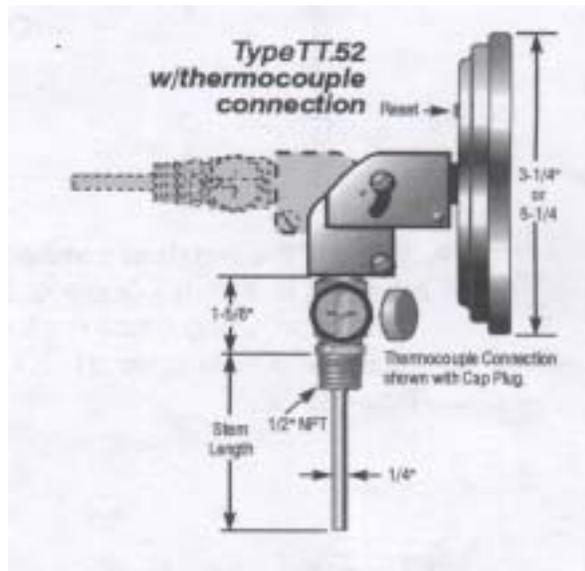


Figura 68. Constitución de un indicador de temperature



8.4 INDICADORES DE NIVEL

Figura 69. Indicador de nivel

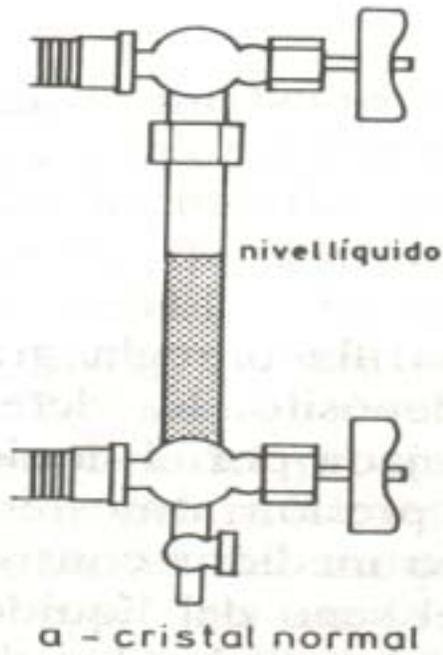


Figura 70. Indicador de nivel de fluido

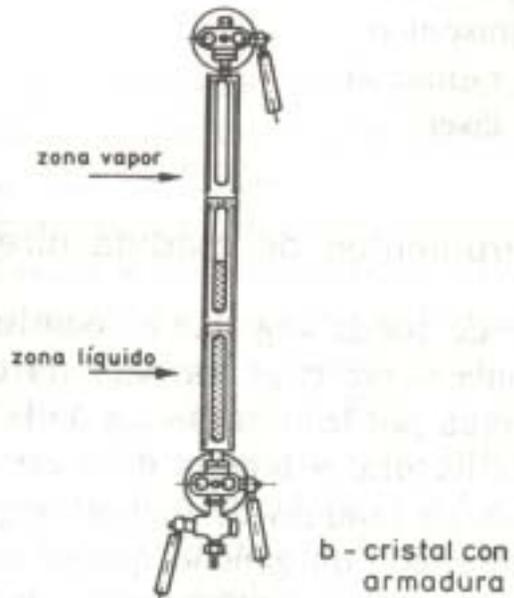


Figura 71. Indicador de nivel de flotador

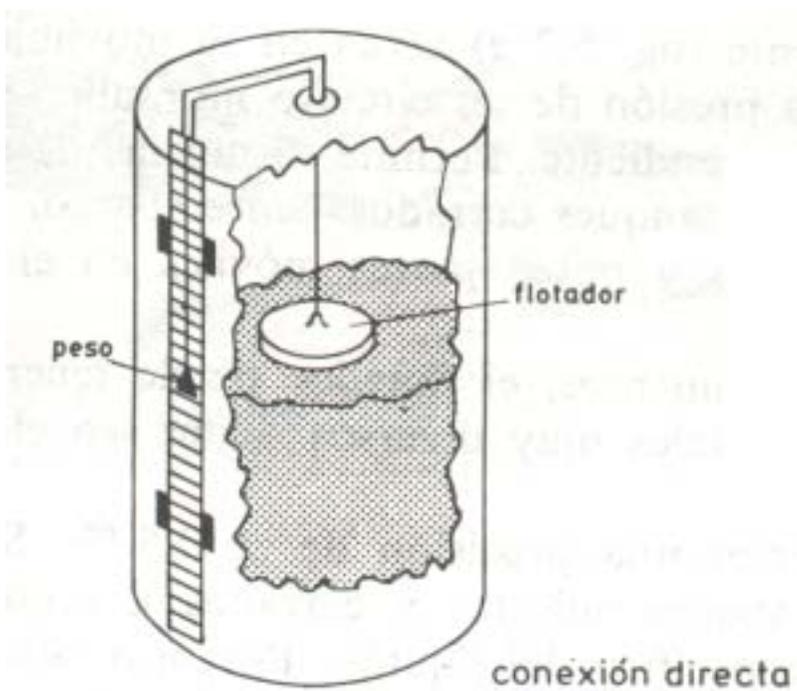
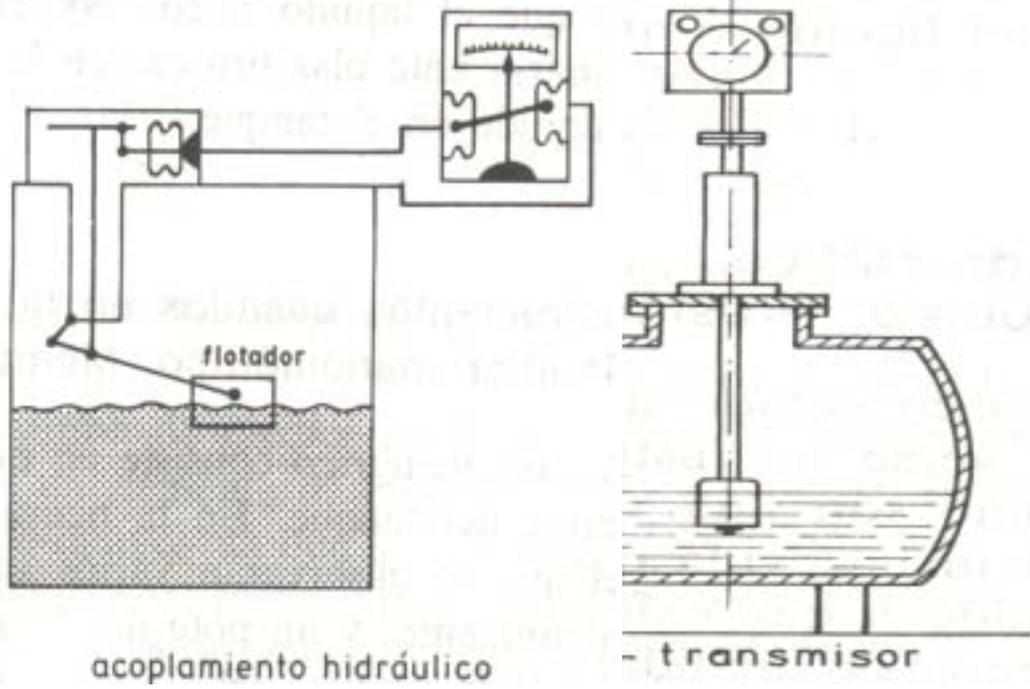


Figura 72. Indicadores de nivel



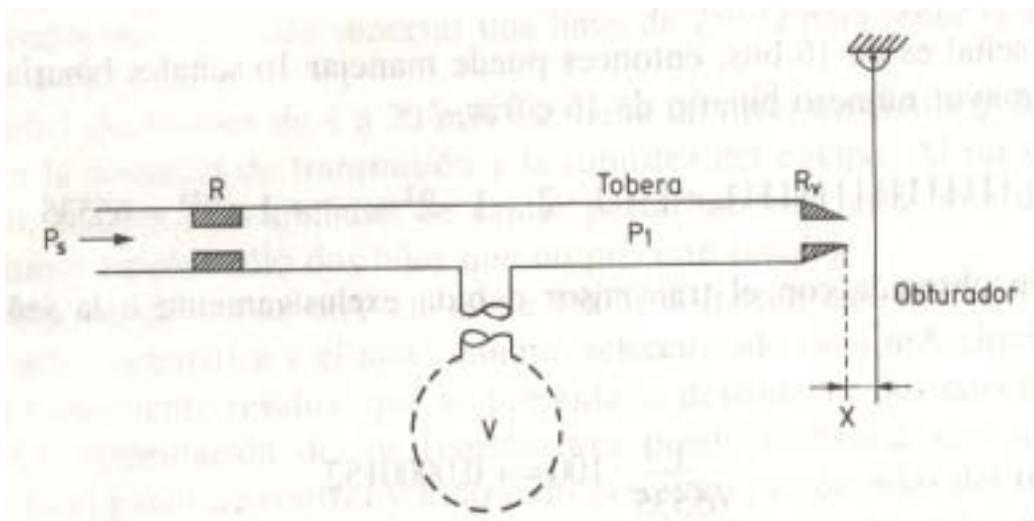
9. INSTRUMENTOS TRANSMISORES

Son instrumentos que captan la variable de proceso y la transmiten a distancia a un instrumento receptor indicador, registrador, controlador o una combinación de estos. Existen varios tipos de señales de transmisión: neumática, electrónica, digitales, hidráulicas y telemétricas. Las mas usadas en la industria son las tres primeras.

9.1 TRANSMISORES NEUMÁTICOS

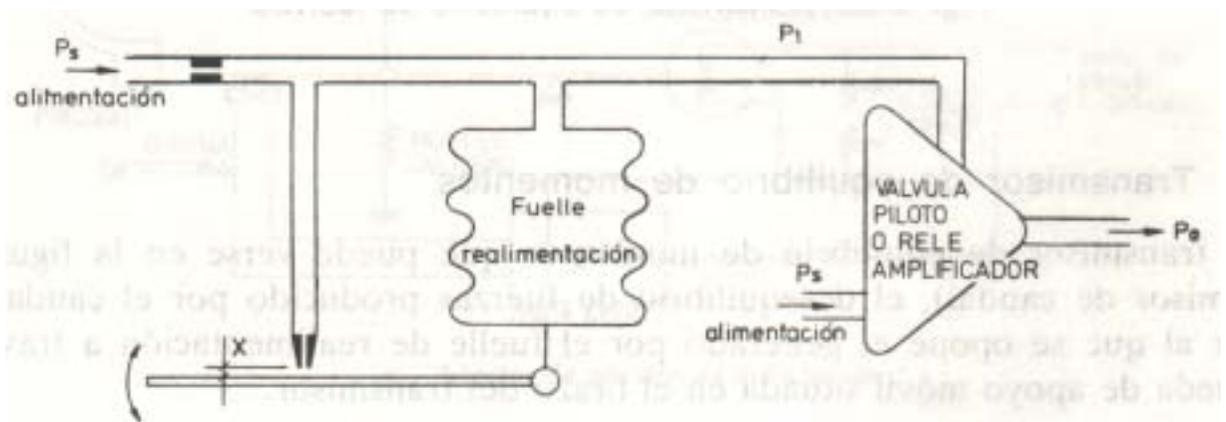
Generan una señal neumática variable linealmente entre 3 a 15 psi para el campo de medida de 0 a 100 de la variable. Bloque amplificador de una o dos etapas: Estos se basan en un sistema tobera – obturador que convierte el movimiento del elemento de medición en una señal neumática.

Figura 73. Constitución de un Transmisor neumático



Transmisores de equilibrio de movimiento: compara el movimiento del elemento de medición asociado al obturador con un fuelle de realimentación de la presión posterior de la tobera. Este conjunto se estabiliza según la diferencia de movimientos alcanzando siempre una posición de equilibrio tal que existe una correspondencia lineal entre la variable y la señal de salida.

Figura 74. Transmisores de equilibrio de movimiento



Ejemplo.

Figura 75. Transmisor de nivel de capilar



Figura 76. Transmisor de temperatura



9.2 TRANSMISORES ELECTRÓNICOS

Generan una señal estándar de 4 a 20 mA de c.c. a distancia de 200 a 1 Km, según sea el tipo de instrumento transmisor. La señal electrónica de 4 a 20 mA tiene un nivel suficiente y de compromiso entre la distancia de transmisión y la robustez del equipo. Al ser continua y no alterna, elimina la posibilidad de captar perturbaciones, está libre de corrientes parásitas y emplea solo dos hilos que no precisan blindaje.

9.3 TRANSMISORES DIGITALES

Consisten en una serie de impulsos en forma de bits. Cada bit consiste en dos signos, el cero y el uno, el uno representa el paso de la señal a través de un conductor y el cero representa no representa el paso de la señal.

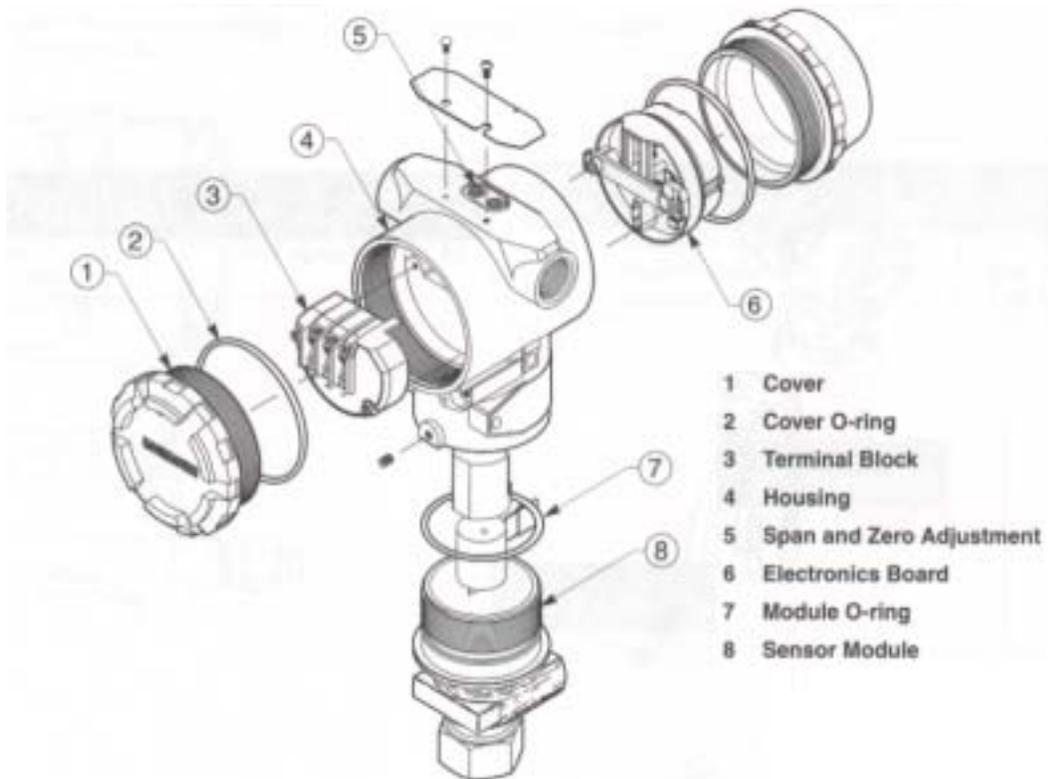
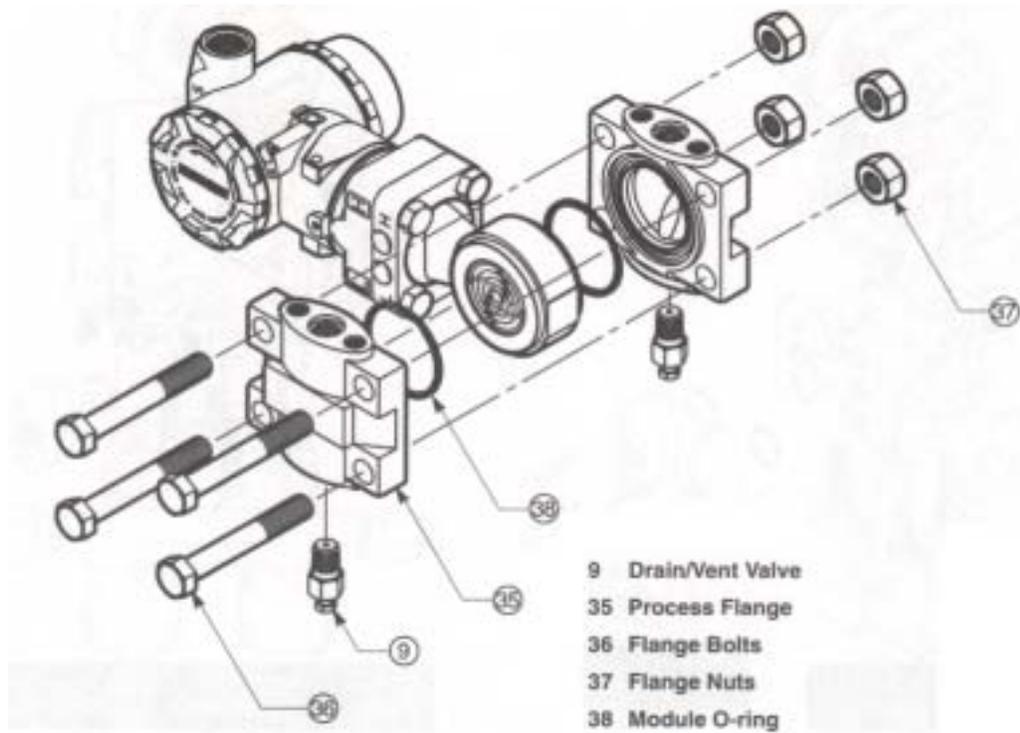
Existe un transmisor digital llamado inteligente (smart transmitter), este termino indica que el sensor tiene incorporadas funciones adicionales que se añaden a las propias de la exclusiva de la variable, dichas funciones son proporcionadas por un

microprocesador. Hay dos modelos de transmisores inteligentes que son: el capacitivo y el de semiconductor

□ Modelo Capacitivo: esta basado en la variación de capacidad que se produce en un condensador formado por dos placas fijas y un diafragma sensible interno y unido a las mismas, cuando se les aplica una presión o presión diferencial a través de dos diafragmas externos. La transmisión de presión del proceso se realiza a través de un fluido (aceite) que rellena el interior del condensador. El desplazador del diafragma sensible es de solo 0,1mm como máximo.

Un circuito formado por un oscilador y demulador transforma la variable de capacidad en señal analógica. Esta a su vez es convertida a digital, y pasa después a un microcontrolador y la transforma a la señal analógica de transmisión de 4 a 20 MA de c.c.

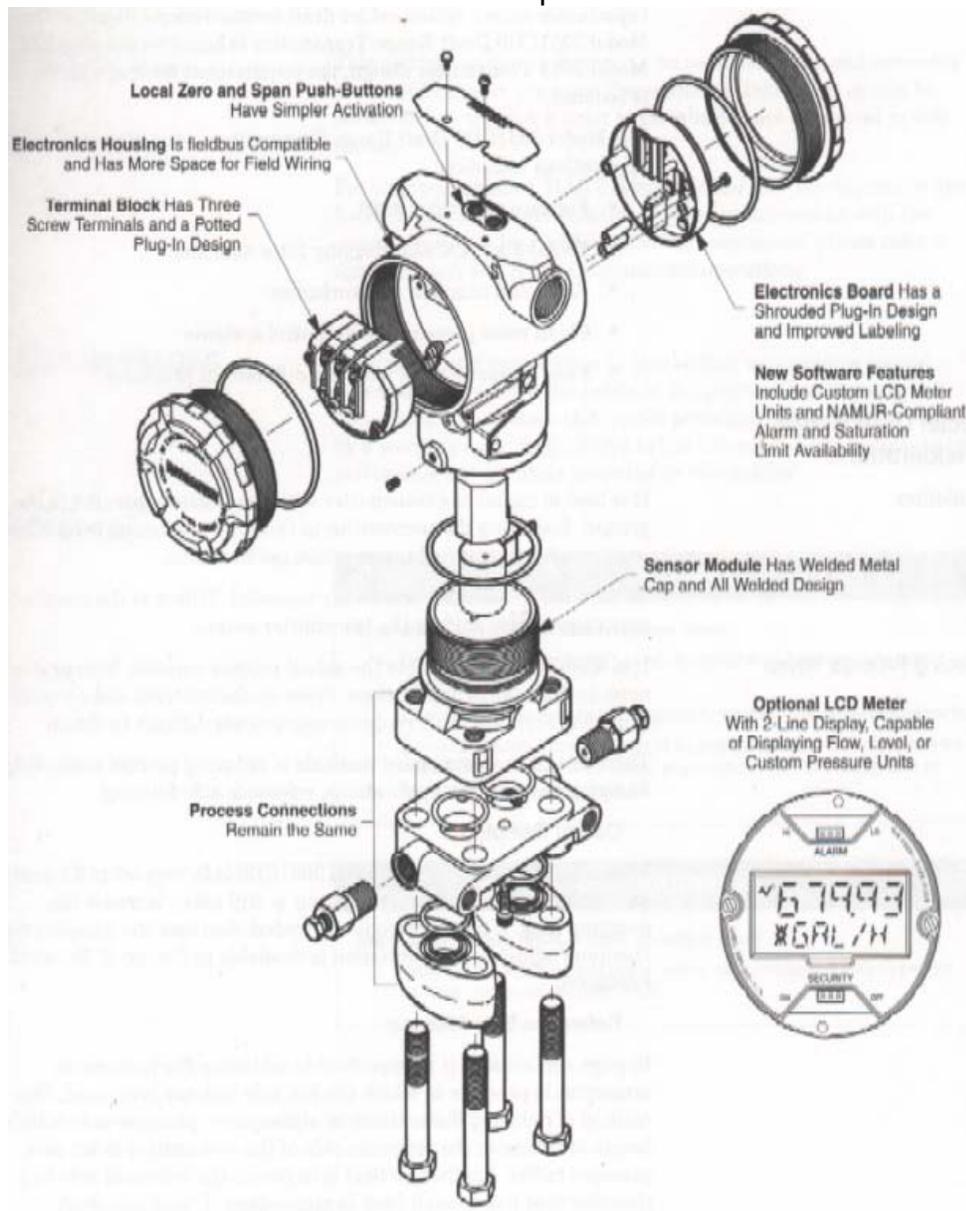
Figura 77. Constitución de transmisores digitales



□ Modelo Semiconductor: aprovecha las propiedades eléctricas de los semiconductores al ser sometidos a tensiones. El modelo semiconductor difundido esta fabricado a partir de una delgada película de silicio y utiliza técnicas de dopaje para generar una zona sensible a los esfuerzos. Se comporta como un circuito dinámico de puente de Wheatstone. Aplicable a la medida de presión.

Ejemplo de transmisores inteligentes:

Figura 78. Constitución de un transmisor de presión



Configuración de alarma y seguridad. Los tipos de alarmas pueden ser por alta (HI) y baja (LO), cuando el instrumento sale de su rango de operación o tiene una falla puede configurarse para que la salida del instrumento se memos de 4 mA c.c (LO) o superior a 20 mA c.c La seguridad del instrumento esta en la posibilidad de configurar o cambiar los rangos del equipo.

Figura 79. Constitución de alarma

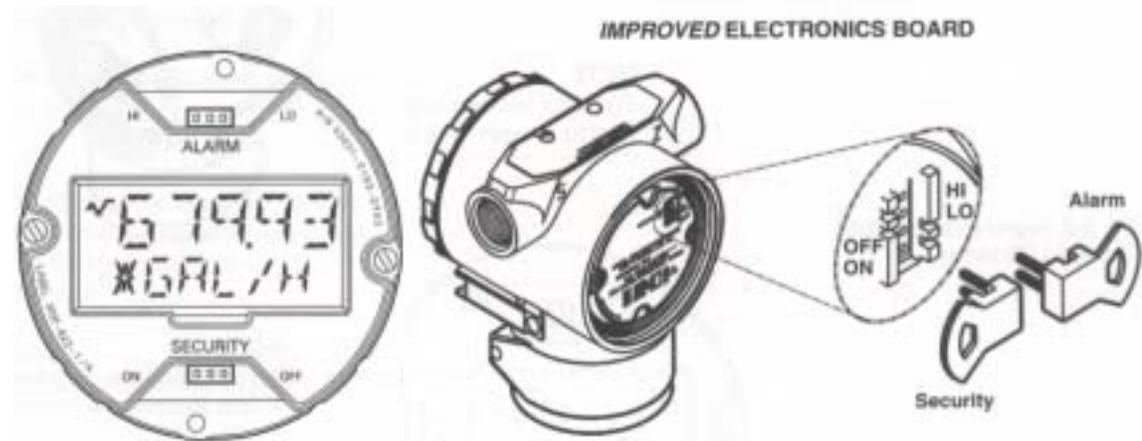


Figura 80. Conexión para comunicación (4 a 20 mA cc)

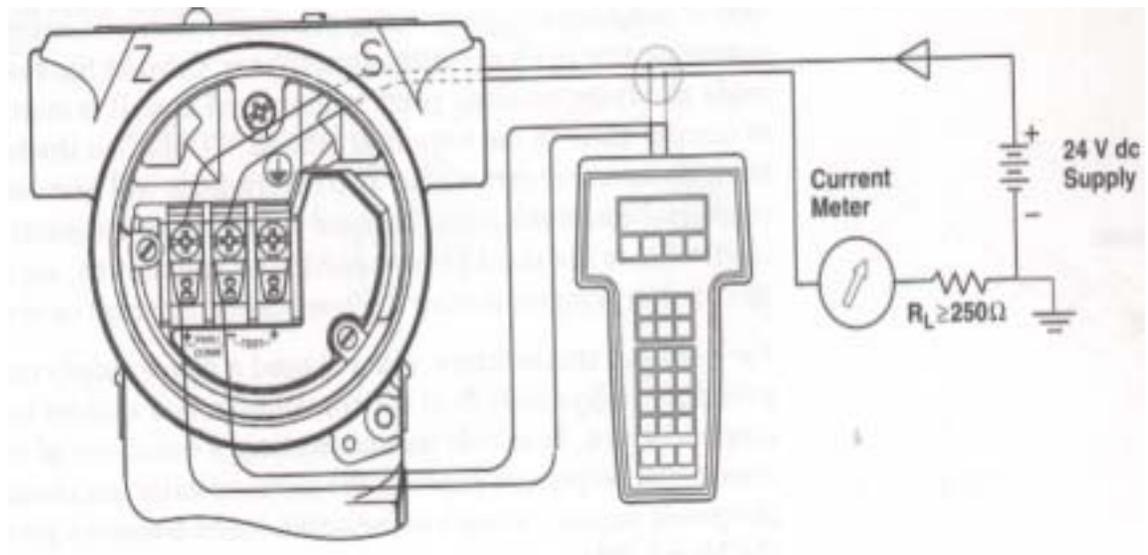
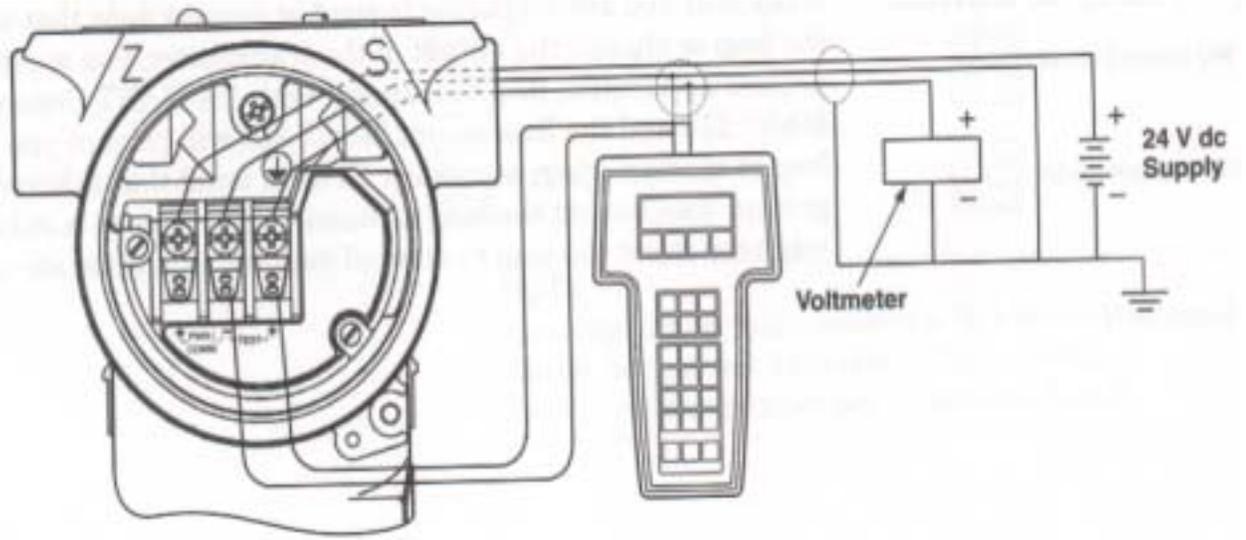


Figura 81. Transmisor de Baja potencia



(Low-Power Transmitters).

Figura 82. Equipo para calibración

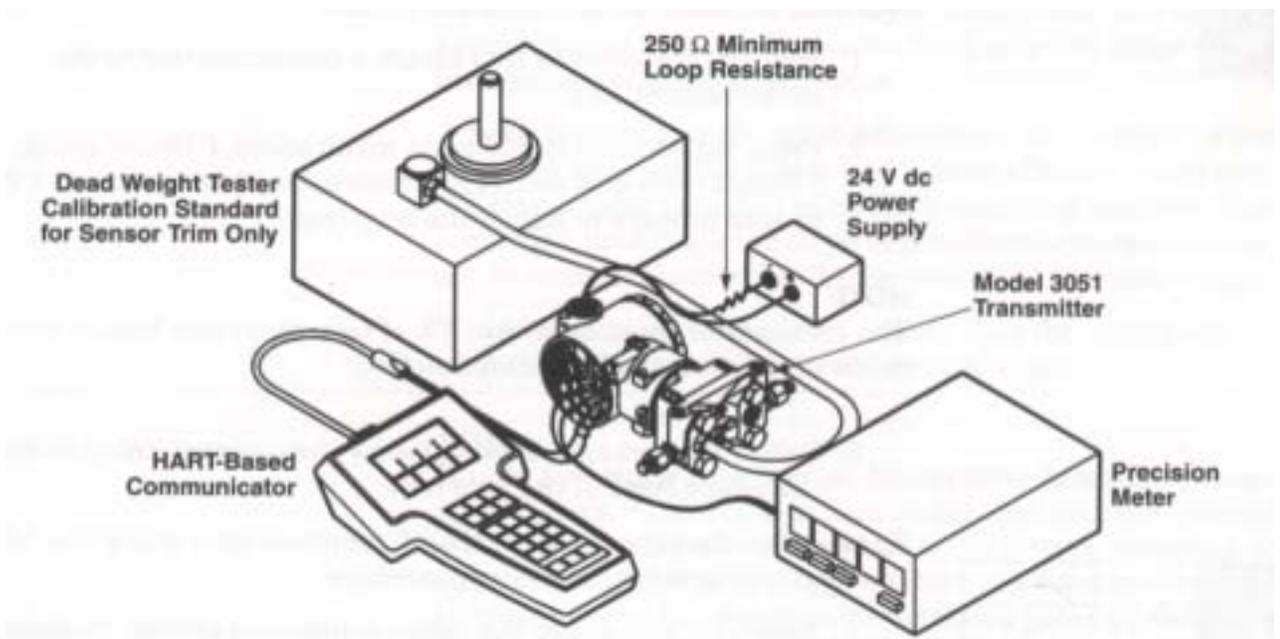


Figura 83. Equipo de calibración

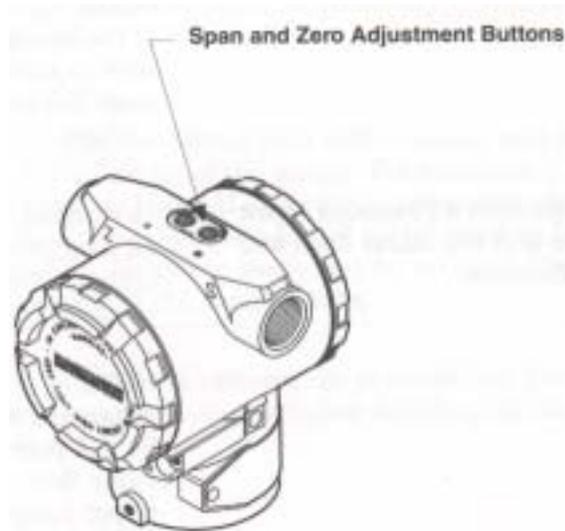


Figura 84. Comparación de transmisores

<i>Transmisor</i>	<i>Señal</i>	<i>Precisión</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Neumático	3-15 psi 0,2-1 bar	$\pm 0,5 \%$	Rapidez Sencillo	Aire limpio No guardan información Distancias limitadas Mantenimiento caro Sensible a vibraciones
Electrónico convencional	4-20 mA c.c.	$\pm 0,5 \%$	Rapidez	Sensible a vibraciones deriva térmica
Electrónico Inteligente	4-20 mA c.c.	$\pm 0,2 \%$	Mayor precisión Intercambiable Estable, Fiable Campo de medida más amplio Bajo coste mantenimiento	Lento (para variables rápidas puede presentar problemas)
Electrónico Inteligente Señal digital	Digital	$\pm 0,1 \%$	Mayor precisión Más estabilidad Fiable Autodiagnóstico Comunicación bidireccional Configuración remota Campo de medida más amplio Bajo coste mantenimiento	Lento (para variables rápidas puede presentar problemas) Falta normalización de las comunicaciones No intercambiable con otras marcas

10. ELEMENTOS FINALES DE CONTROL

Los elementos finales de control son los dispositivos encargados de transformar una señal de control en un flujo de masa o energía (variable manipulada). Esta variable manipulada es la que incide en el proceso causando cambios en la variable controlada. Lo más común en procesos es que la manipulación sea un caudal.

Para ajustar el flujo de fluidos en una lineal de un proceso existen dos formas o mecanismos que son; primero modificando la energía entregada al fluido (variando bombas y ventiladores de velocidad variable) y segundo modificando la resistencia al paso del fluido (variando válvulas y registros de ductos).

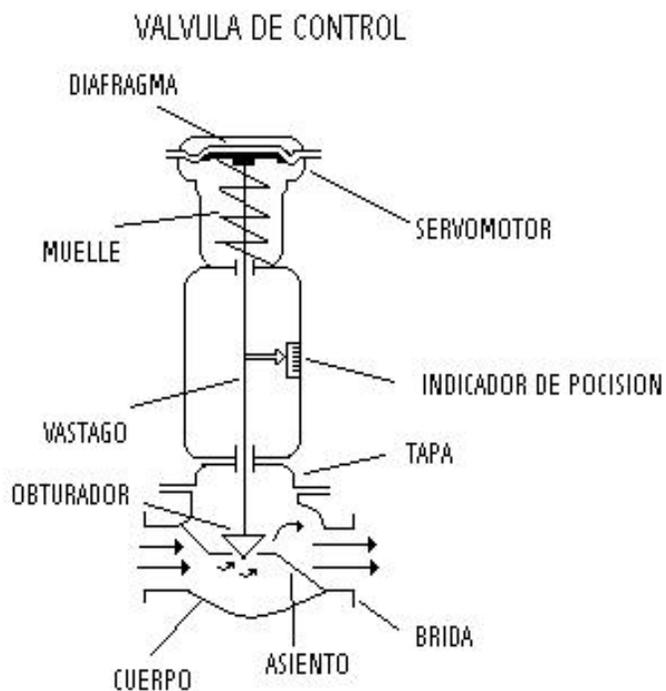
10.1 VÁLVULAS DE CONTROL

El método más común de influenciar el comportamiento de un proceso químico es a través de la rata de flujo de los fluidos de proceso. Normalmente, se manipula una **resistencia variable** al flujo en el conducto cerrado o tubería para alterar la rata de flujo y lograr el comportamiento del proceso que se desea. Una válvula⁷ con una apertura variable según el flujo es el equipo estándar para introducir esta resistencia variable; se selecciona una válvula porque es un equipo simple, confiable, de relativo bajo costo y está disponible para un amplio rango de aplicaciones en procesos. En algunos casos la resistencia de la válvula es ajustada por una persona variando la apertura, como en el caso de un grifo doméstico. En muchos casos la resistencia de la válvula la determina un controlador automático, y en este caso la válvula está diseñada para aceptar e implementar la señal enviada por el controlador.

⁷ Ver carpeta de instrumentación (PDF, válvulas)

Entonces, la válvula de control es básicamente un orificio variable por efecto de un actuador; y son instrumentos que actúan en forma directa sobre la variable, ejerciendo paso a paso las ordenes del controlador que van dirigidas hacia la variable controlada. La función de la válvula es regular el paso de caudal mediante la variación del área de un orificio, esta hace parte del bucle cerrado de control como elemento final del proceso. La siguiente grafica muestra las partes de una válvula de control.

Figura 85. Configuración de válvula de control



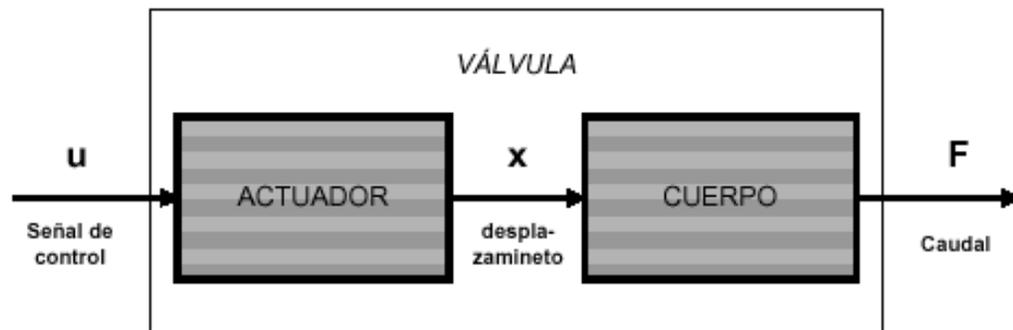
Esta válvula utiliza una señal externa que puede ser neumática o eléctrica y posteriormente la transforma en una de tipo neumática que incide en el cabezal de la válvula.

Estos elementos que componen la válvula se pueden considerar en dos partes: el actuador, que es el que recibe la señal del controlador y la transforma en un

desplazamiento (lineal o rotacional) debido a un cambio en la presión ejercida sobre el diafragma; el cuerpo donde el diafragma esta ligado a un vástago o eje que hace que la sección de pasaje fluido cambie y con este el caudal.

Con un diagrama se puede representar a la válvula como un sistema en serie

Figura 86. Diafragma representativo de una válvula



Desde el punto de vista estático el actuador es moderadamente lineal y la dinámica más significativa es la de llenado del cabezal con una constante de tiempo del orden de los segundos. El cuerpo carece de retardo y la ganancia viene determinada por la característica del flujo.

10.1.1 Cuerpos de válvulas. Toda válvula debe de estar diseñada para resistir ciertos efectos de temperatura ocasionada por la fricción, y principalmente para las características de presión de fluidos, deben estar regidas por las normas DIN y ANSI. Para empalmar con las tuberías deben poseer roscas, bridas (con resalte y planas) machihembras, soldadura con encaje y a tope.

Suelen ser de hierro o acero inoxidable, hastelloy b o c y de materiales termoplásticos de hasta 140° y 10 bar, sus características deben de estar diseñadas para abolir la corrosión, abrasión y congelación.

10.1.2 Tapa de la válvula. Une el cuerpo al servomotor, por esta se desliza el vástago accionado por el motor, el vástago tiene un índice que indica la escala.

Las empaquetaduras para esta son de diversas características según las características de presión y de temperaturas de trabajo.

10.1.3 Partes internas. Son todos aquellos que tiene que ver con el obturador y sus asientos, es decir vástago y sus anillos, relación obturador asientos, que para escogerlos necesitamos tener en cuenta:

- Materiales adecuados para controlar la corrección y el desgaste.
- Características del fluido.
- Tamaño normal o reducido del caudal de la válvula con el mismo tamaño del cuerpo, son de acero inoxidable.

10.1.4 Características de caudal efectivas. El comportamiento real de carrera de válvula Vs. caudal es muy diferente del ideal. La pérdida de la presión de la válvula con capacidad nominal (apertura completa) con relación a la pérdida de carga del sistema (línea + válvula) se obtiene el coeficiente r , que dependerá del tamaño de la válvula con relación al de la tubería (a menor diámetro de la válvula mayor es r) y será igual al valor real e ideal cuando $r = 1$, es decir, cuando la línea no absorbe presión y queda disponible para la válvula.

Q_v : caudal a través de la válvula.

$$Q_v = k A \sqrt{\Delta p}$$

K : constante, A : área de paso, Δp : presión diferencial.

p : presión diferencial.

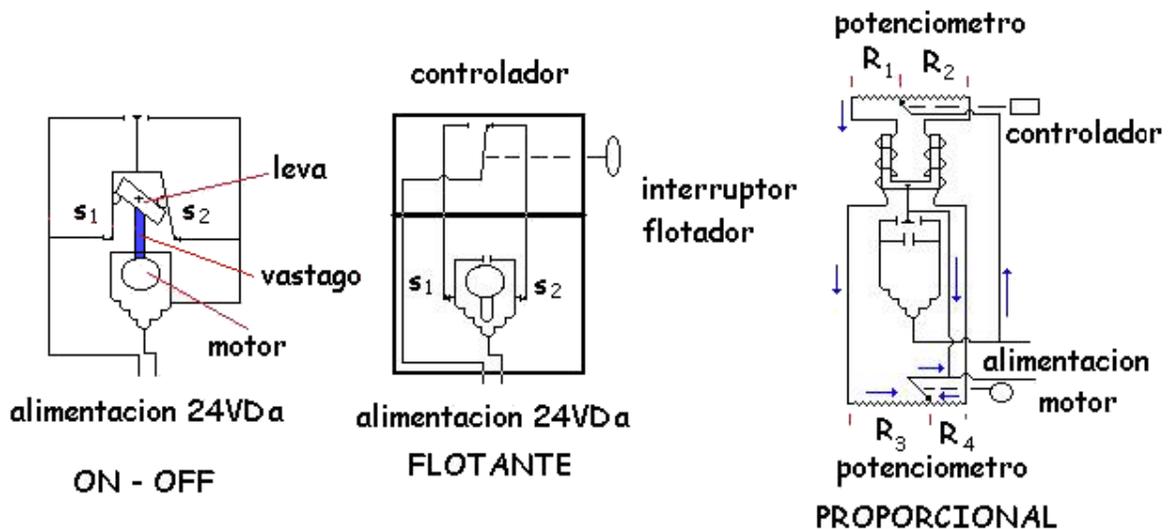
Un bucle de control es estable si la ganancia es menor que 1, la válvula más utilizada es la isoporcentual, cuando el comportamiento no es bien conocido y los datos no son fiables.

10.1.5 Servomotores. En su mayoría son neumáticos, pero pueden ser hidráulicos o digitales. Proporcionan la fuerza y el movimiento del obturador. Pueden ejercer tres tipos de control: on – off, flotante y proporcional. El on - off consiste en un

motor unidireccional el cual es controlado internamente por dos micro interruptores finales de carrera activados por una leva; la válvula se controla por medio de dos contactos posibles en un interruptor en el que se ocasiona el cierre de la misma. Su funcionamiento consiste en la energización de dos bobinas que ocasionan el giro del motor.

El flotante consiste en que el interruptor del controlador es flotante. El proporcional esta conformado por dos potenciómetros uno del controlador y el otro del motor donde el primero es el que varia constantemente con la finalidad de variar la corriente a través de los dos devanados que ocasionaran magnéticamente en el releé un desplazamiento sobre un eje central que será transmitido hacia los contactos de excitación de las bobinas de giro del motor donde este a su vez se encarga de variar su potenciómetro mediante brazos hasta lograr igualar las corrientes en las bobinas respecto a la ubicación de su homólogo, logrando equilibrar de nuevo el releé.

Figura 87. Servomotores eléctricos

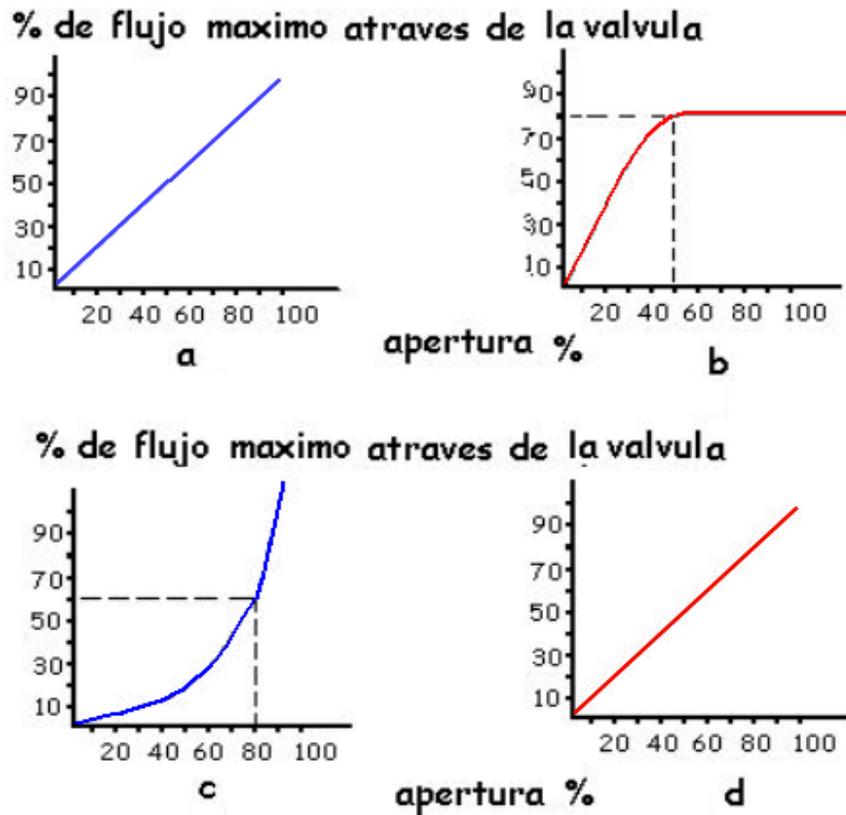


10.1.6 Servomotores neumáticos. Esta compuesta de un diafragma que junto a un resorte limita la salida de la señal estándar de presión, el resorte es utilizado como mecanismo de contraposición a la ejecución del diafragma en respuesta a la señal neumática, donde para su total abertura la presión debe estar en 15 Psi y su inversa como se conoce es de 3Psi. Es difícil mantener cierta proporcionalidad debido a la influencia de factores como rozamientos, lineabilidad de respuesta del resorte, y ajustes entre obturador y asientos.

10.1.7 Características de flujo en las válvulas. Todo análisis de instrumentos pretende hallar una respuesta lineal con respecto al comportamiento de la variable y el efecto ocasionado por el dispositivo, pero en realidad en las válvulas las características de flujo reales vienen afectadas por las condiciones de las tuberías y por el mismo tipo de válvula donde existe en si una caída de presión constante, que realmente no lo es por la variabilidad de apertura de la misma; El flujo disminuye cada vez que se incrementa la apertura para una caída dada de cambio en la posición de la válvula, dentro de las muchas diversidades de válvulas encontramos según su forma interior un respectivo comportamiento frente a la equivalencia entre la apertura y el flujo a través de la válvula.

Algunos comportamientos no son muy convenientes como el de la figura B donde para un 50% de apertura ocurre un 80% del cambio de flujo; La figura nos muestra la solución de este problema ya que muestra una válvula donde las características de flujo se comporta gráficamente cóncava hacia arriba, al instalar este tipo de válvula en un sistema de tubería que tiene una característica cóncava hacia abajo, la característica del fluido se representa como en la figura.

Figura 88. Gráficas de flujos de válvulas



10.2 ESPECIFICACIONES DE VÁLVULAS

Especificar una válvula de control implica determinar las características de:

- Cuerpo e internos: indicando el tipo, material y serie que se fija de acuerdo al servicio que debe prestar. también hay que indicar el diámetro que esta relacionado con la capacidad y a esto se lo denomina dimensionamiento. Por ultimo algunos tipos de válvulas permiten elegir la característica de flujo.
- Actuador: una vez conocidos los detalles del cuerpo se debe elegir el tipo de motor (neumático de cabezal o pistón, eléctrico, etc.), la acción ante falla y el tamaño.

- Accesorios: corresponde a elementos adicionales como transductores I/P o V/P, volante para accionamiento manual, posicionador, etc.

10.3 DIMENSIONAMIENTO DE VÁLVULAS

El dimensionamiento de la válvula de control involucra la determinación de la válvula correcta a instalar de entre muchas válvulas comercialmente disponibles.

El procedimiento está basado en la información suministrada por los fabricantes de válvulas, quienes especifican la capacidad de sus válvulas usando el coeficiente C_v . o coeficiente de la válvula, C_v está definido como el flujo de agua que pasará a través de la misma, con una apertura del 100% y una caída de presión de 1 psi. En estas tablas, las unidades de C_v son galones de agua por minuto por $\text{psi}^{(1/2)}$. El ingeniero debe calcular el C_v deseado para el fluido de proceso y las condiciones mediante una apropiada aplicación de los factores de corrección y seleccionar la válvula usando las tablas de C_v versus la posición del vástago de la válvula y el tamaño de tubería suministrado por los fabricantes.

El flujo requerido y la información de la caída de presión usada para dimensionar una válvula está basada en las operaciones del proceso y del equipo, y el formato: ISA Form S20.50 (ISA, 1992) proporciona un método muy útil para registrar los datos. El tamaño de la válvula depende de la caída de presión a través de la válvula. Una guía general para sistemas de bombeo es que la caída de presión de la válvula debe ser de un 25-33% de la caída total de presión entre la fuente y el extremo de la tubería. Para proporcionar una rangeabilidad apropiada, el C_v (rata de flujo) debe determinarse para los extremos esperados de la operación. Típicamente, una válvula debe seleccionarse, tal que tenga el máximo valor de C_v en aproximadamente el 90% de la posición del vástago; esta pauta permite alguna capacidad extra.

El valor debe tener el máximo C_v correspondiendo con una posición del vástago que no sea menor del 10-15%, lo anterior dará una rangeabilidad razonable, esto se cumple dado que la exactitud de la característica es pobre para valores por debajo del 10% de la posición del vástago.

10.4 EQUIPOS ADICIONALES DE LA VÁLVULA DE CONTROL

Para el buen funcionamiento de la válvula de control se requiere equipo adicional, y algunos de los más importantes se describen a continuación.

□ **Actuador:** El actuador proporciona la potencia que se requiere para mover el vástago de la válvula y el obturador. La fuente de potencia usada, en la mayoría de las aplicaciones industriales, para los actuadores es el aire, por razones de seguridad y confiabilidad.

Muchos actuadores se describen como "de diafragma" porque la señal neumática de presión se transmite a una cámara del actuador la cual está sellada con un diafragma flexible. El vástago de la válvula esta conectado al diafragma, por medio de un resorte que obliga a la válvula a permanecer completamente abierta o completamente cerrada cuando la presión del aire está a la atmósfera. La presión del diafragma es igual a la señal de control neumática, normalmente 3-15 psi que representan 0-100% de la señal, la cual obliga al diafragma a cambiar de posición, moviendo el vástago de la válvula a la posición especificada por la señal de control.

□ **Propulsor (Booster):** Como la rata de flujo de aire en la línea neumática no es grande se puede necesitar un tiempo muy significativo para transferir la suficiente cantidad de aire hasta el actuador, de tal forma que la presión del actuador iguale la presión de la línea.

Este tiempo hace más lenta la respuesta dinámica del sistema de lazo cerrado y puede degradar el funcionamiento del control. Cuando el retraso es significativo comparado con los otros elementos en el lazo de control, se puede colocar un propulsor (booster) en la línea neumática cerca de la válvula, esto aumenta la tasa de flujo volumétrico de aire y mejora en gran manera las velocidades la respuesta dinámica del actuador.

□ **Posición de Falla:** Las principales fallas del equipo de control, tales como la rotura de una línea neumática o el disparo del compresor de aire, ocasionan una baja presión (atmosférica) en la señal que va al actuador. En tales situaciones, cuando se ha perdido el control, la válvula debe diseñarse para alcanzar la posición más segura posible, normalmente esta posición es totalmente abierta o totalmente cerrada.

La posición de falla apropiada debe determinarse a través de un análisis cuidadoso del proceso específico; normalmente, la presión y temperatura cerca de los valores atmosféricos son los más seguros. La posición de falla se logra seleccionando el diseño en el cual la válvula actuadora posiciona el vástago de la válvula en su posición más segura. El diseño comúnmente se describe como "abierto a la falla" o como "cerrado a la falla". Pueden lograrse otros modos ante la falla en respuesta a circunstancias inusuales, por ejemplo, una posición fija a la falla o movimiento lento a la posición segura a la falla.

□ **Posicionador:** La válvula es un dispositivo mecánico que debe vencer la fricción y la inercia para mover el vástago y obturar en la posición deseada. Típicamente, la válvula no logra exactamente la posición especificada por la señal de control. Esta imperfección puede no ser significativa porque los controladores retroalimentados tienen un modo integral para reducir el desplazamiento (offset) a cero en estado estacionario. Sin embargo, la diferencia podría degradar el funcionamiento del control, sobre todo en un lazo de control lento. Un posicionador

es un simple controlador solo-proporcional que regula la posición del vástago muy cerca del valor especificado por la señal de control a la válvula.

□ **Volante:** Algunas válvulas de control ocasionalmente deben ser ajustadas en posiciones específicas por el personal a cargo del equipo de proceso. Una volante manual proporciona la facilidad para que el personal localmente opere la válvula anulando (sin tener en cuenta la) la señal de control a la válvula.

10.5 PARÁMETROS

Las exigencias de un control de proceso excelente ponen muchos requisitos al desempeño de las válvulas de control. Algunos de los requisitos generalmente más aplicables son los siguientes:

□ **Capacidad:** La válvula debe tener una capacidad para la mayoría de las situaciones límites durante el funcionamiento de la planta. Las guías típicas recomiendan alguna capacidad extra por sobre las condiciones de diseño; sin embargo, el ingeniero debe considerar todas las situaciones probables tales como: perturbaciones mayores, diferentes materiales de alimentación, y un rango de calidades del producto. Cuando hay flujos más grandes que el valor de diseño, el ingeniero debe considerar dos válvulas de control con rangos diferentes.

□ **Rango:** El rango indica la magnitud de los valores de flujo que la válvula puede regular dentro de un margen confiable; flujos muy grandes o muy pequeños no pueden ser mantenidos en los valores deseados. El rango normalmente se expresa como la relación entre el flujo más grande y el flujo más pequeño.

□ **Corte:** Algunas situaciones requieren que la válvula sea capaz de reducir el flujo prácticamente a cero. De tal manera que algunas válvulas están diseñadas para un cierre hermético, mientras que otras no alcanzan a reducir el flujo a cero. Es de notar que si el flujo cero es una condición de alta prioridad, se debe instalar, adicionalmente, una válvula especial que proporcione un cierre hermético, colocándola en serie con la válvula de control.

- **Pérdida de presión:** La pérdida de presión no-recuperable a través de una válvula representa una pérdida de energía que puede representar un costo significativo en algunas situaciones, especialmente cuando se tienen sistemas de gas presionado por compresores.
- **Banda muerta:** Se puede presentar un goteo insignificante del fluido cuando el vástago entra en el cuerpo de la válvula. También puede ocurrir que se presente una fricción considerable entre el vástago y el buje de la válvula, esta fricción puede inhibir el libre movimiento del vástago, sobre todo para pequeños cambios en la posición del vástago. En muchos casos, se requiere un equipo auxiliar, como un posicionador, para reducir la banda muerta a un valor aceptablemente pequeño.
- **Respuesta Dinámica:** La válvula de control es una componente del lazo de control retroalimentado, así que cualquier retardo en la respuesta degradaría el desempeño del control. Naturalmente, la respuesta de la válvula es mucho más rápida que muchas unidades de proceso; sin embargo, en algunos lazos de control instalados en procesos rápidos como los compresores, el control de flujo y de presión requieren válvulas de respuesta rápida. La experiencia con válvulas demuestra que sus respuestas dependen del diseño, del equipo auxiliar como los posicionadores y propulsores y del tamaño de las manipulaciones de la válvula.
- **Taponamiento:** Los fluidos con contenidos de sólidos pueden causar el taponamiento de los orificios de restricción de las válvulas, para lo cual se cuenta con diseños especiales que reducen la posibilidad de taponamiento.
- **Balance:** En algunas situaciones la caída de presión a través de la válvula puede llegar a ser muy grande. En tales situaciones se puede requerir una fuerza muy grande para abrir o cerrar la válvula; para evitar la necesidad de grandes fuerzas, hay disponibles válvulas con un sistema de balance de la caída de presión.
- **Exactitud:** Las válvulas son dispositivos mecánicos instalados en ambientes extremos que involucran movimientos relativamente pequeños. De tal manera que

el movimiento real del vástago de la válvula puede no ser el mismo que corresponda a la señal enviada a la válvula.

□ **Vaporización instantánea (flashing):** La caída de presión a través de la válvula puede producir una vaporización parcial en el líquido; esta situación se denomina vaporización instantánea si el fluido después de válvula permanece por lo menos parcialmente vaporizado.

□ **Cavitación:** Mientras que el fluido a la entrada y a la salida de una válvula de control permanece como líquido, pueden existir dos fases en los puntos donde el área del flujo es más estrecha y la presión está en un mínimo. Esta vaporización temporal es denominada cavitación y puede causar daños severos a la válvula.

10.6 ACCIONES DE LA VÁLVULA

10.6.1 Directa. Sin aire para abrir o con aire para cerrar, donde el muelle ejerce una fuerza en sentido norte mientras que la presión se efectúa en sentido sur. Se comporta normalmente cerrado cuando el obturador trabaja sobre la parte inferior de los asientos y es normalmente abierta cuando el obturador se desplaza en la parte superior de los asientos

Un dispositivo normalmente cerrado es uno de los mejores sistemas de bloqueo para la seguridad industrial en el manejo de variables hidráulicas y neumáticas, cosa muy inversa para los sistemas eléctricos en general.

10.6.2 Inversa. Sin aire para cerrar o con aire para abrir. La presión trabaja en sentido norte mientras que el muelle se opone a esta, es normalmente abierta para el obturador ubicado en la parte inferior de los asientos que para los normalmente cerrados en donde se sitúa al contrario.

Algunas inestabilidades se dan a causa de la fuerza de rozamiento del vástago o por la fuerza estática del fluido sobre el obturador, pero para darle solución se utiliza un posicionador, el cual compara la posición de entrada con la señal del

vástago y si hay error lo corrige amplificando proporcionalmente la presión en el servomotor neumático, pero si es eléctrico trabaja bajo el principio de transducción electro neumático donde la variación para la corrección se hace estable cuando la fuerza de error es igual al de la bobina electromagnética. Para un mejoramiento del tiempo de respuesta de la válvula se utiliza un booster que es un instrumento que amplifica el caudal de aire en la salida, recibe un volumen de entrada de aire muy pequeño par efectuar su misión.

Los transmisores de posición de vástago son los que nos permiten monitorear la apertura de la válvula, son microinterruptores que envían una señal eléctrica estándar al panel.

Figura 89. Acciones de la válvula

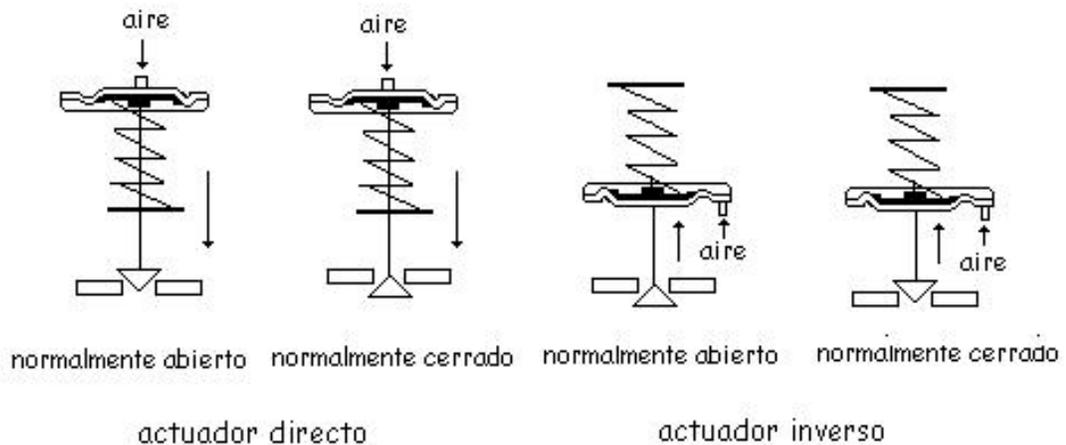
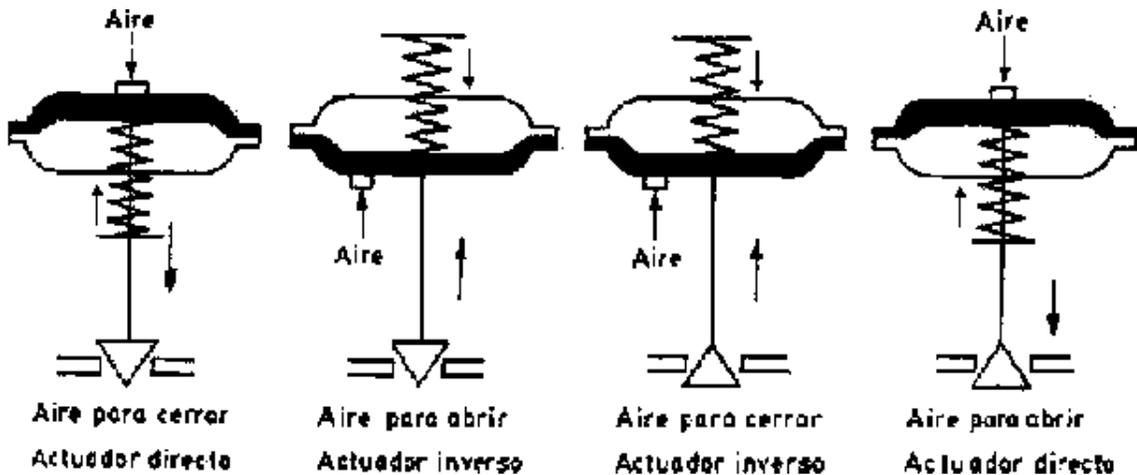


Figura 90. Acciones de la válvula



10.7 RUIDO

Son las interferencias generadas a causa de la dinámica de los fluidos. algunos son:

- **Vibración mecánica:** choque de presión como golpeteo metálico aproximadamente a 1500Hz, se reduce al cambiar la masa del obturador.
- **Ruido hidrodinámico:** consiste en la circulación de líquidos por la válvula.
- **Ruido aerodinámico:** flujo turbulento de vapor o aire despreciable en los líquidos, se produce por obstrucciones en el flujo del fluido, por expansión rápida o desaceleración del gas a alta velocidad al salir de la válvula, o por tubos o curvas bruscas existentes en los sistemas de tubería; si el fluido alcanza la velocidad del sonido se incrementan los niveles de ruido.

10.8 TIPOS DE VÁLVULAS

Existen diversos tipos de cuerpos que se adaptan ala aplicación. Teóricamente el tipo debe adoptarse en función de las necesidades del proceso, aunque a veces

hay razones, económicas, por ejemplo, que obligan a usar un tipo aunque este no sea el mas adecuado.

Las válvulas se dividen según el diseño del cuerpo y de su obturador; las hay de desplazamiento lineal y circular según el desplazamiento del obturador.

10.8.1 Movimiento lineal

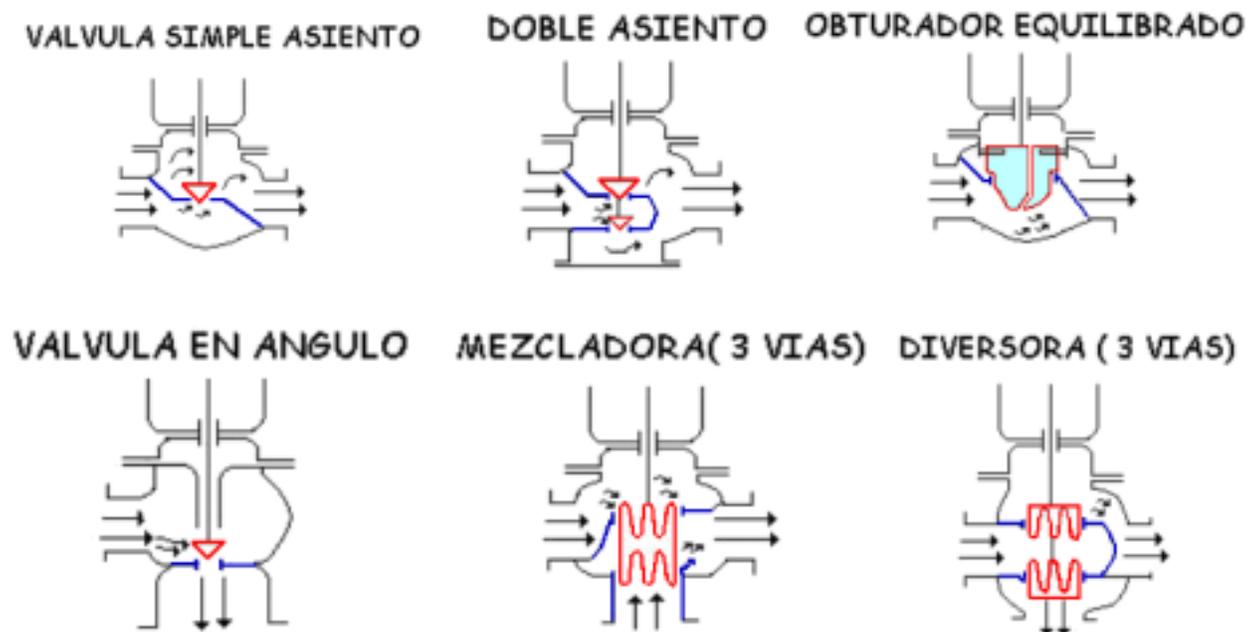
□ **Válvula de Globo:** el nombre "globo" se refiere a la forma externa de la válvula, y no al área de flujo interna. Una válvula de globo típica tiene un vástago ajustado linealmente (hacia arriba y hacia abajo) para cambiar la posición del obturador. A medida que el obturador cambia, el área para el flujo entre el obturador y el asiento de la válvula (apertura) cambia. Muchos diseños de asientos y obturadores se encuentran disponibles para alcanzar las relaciones deseadas entre la posición del vástago y la rata de flujo; las hay de simple asiento o presión de fluido baja, también las hay de doble asiento con obturador equilibrado, etc. El obturador estándar debe oponerse a la caída de presión a través de la válvula, lo cual es aceptable para pequeñas caídas de presión. Para grandes caídas de presión, se usa una válvula de globo balanceada para hacer que una válvula sea capaz de abrir y cerrar el obturador con una pequeña fuerza.

Características:

- Aplicación limitada para fluidos con partículas en suspensión.
- Disponible en diversos modelos (simple y doble asiento, guiado en caja, etc.).
- Existen tipos especiales para aplicaciones criogénicas, para vaporización, etc.
- Rangeabilidad 35:1 a 50:1.
- Amplia disponibilidad de características de flujo.
- Diámetros hasta 24 pulgadas.

- **Válvula de Angulo:** Permite un flujo sin turbulencias, se usa con fluidos que se vaporizan fácilmente y está diseñada para grandes presiones diferenciales que contienen sólidos en suspensión.
- **Válvula de Tres Vías:** generalmente se utiliza para el control de temperaturas en el intercambiado de calor, sirve para mezclar fluidos y derivar un fluido en dos de salida, es una válvula diversora.

Figura 91. Tipos de válvulas



- **Válvula de Jaula:** Son de gran tamaño y permiten una alta presión diferencial, son de cierre hermético.
- **Válvula de Compuerta:** Se mueve verticalmente, su utilización es para el control on - off, ya que en posiciones intermedias tiende a bloquearse. Estas válvulas tienen una barrera plana, la cual se ajusta para variar el área para el flujo. Estos cuerpos se usan principalmente en válvulas operadas manualmente y en válvulas automatizadas para cierres de emergencia.

Características:

- Presenta un cierre hermético.
- Solo se utiliza para fluidos limpios.

- **Válvula En Y:** Esta diseñada para cierre y control, es de control on - off especialmente para trabajar en bajas temperaturas.

Figura 92. Tipos de válvula



- **Válvula De Cuerpo Partido:** Permite un flujo suave del fluido, es diseñada para líquidos viscosos y para la industria alimentaria.

- **Válvula Saunders:** Se caracteriza por tener una membrana flexible como obturador, debe tener un servomotor muy potente para ajustar la membrana. Se utiliza para procesos químicos difíciles.

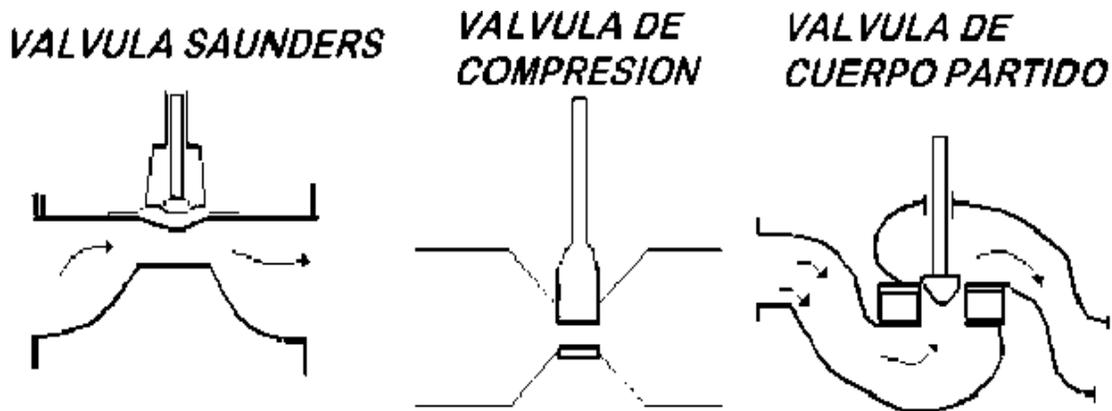
También es llamada válvula de diafragma la cual tiene una superficie, que se deforma por la acción de la fuerza que ejerce el vástago de la válvula para variar la resistencia al flujo.

Características:

- ❑ Ampliamente usadas para el manejo de fluidos corrosivos o erosivos.
- ❑ Se puede usar en lechadas.
- ❑ Es de construcción simple.
- ❑ Presenta cierre hermético y las partes móviles no tienen contacto con el fluido.
- ❑ Limitado rango para presiones y temperaturas de trabajo.
- ❑ Rangeabilidad entre 3:1 y 15:1.
- ❑ Presenta un diafragma de corta vida.

Válvula de Compresión: Consiste en la unión de dos elementos flexibles, lo que proporciona un eficiente cierre parcial; se utiliza para fluidos negros corrosivos, viscosos o que poseen partículas en suspensión.

Figura 93. Tipos de válvulas



10.8.2 Movimiento circular. Su obturador es de superficie esférica que tiene un movimiento rotativo o excéntrico.

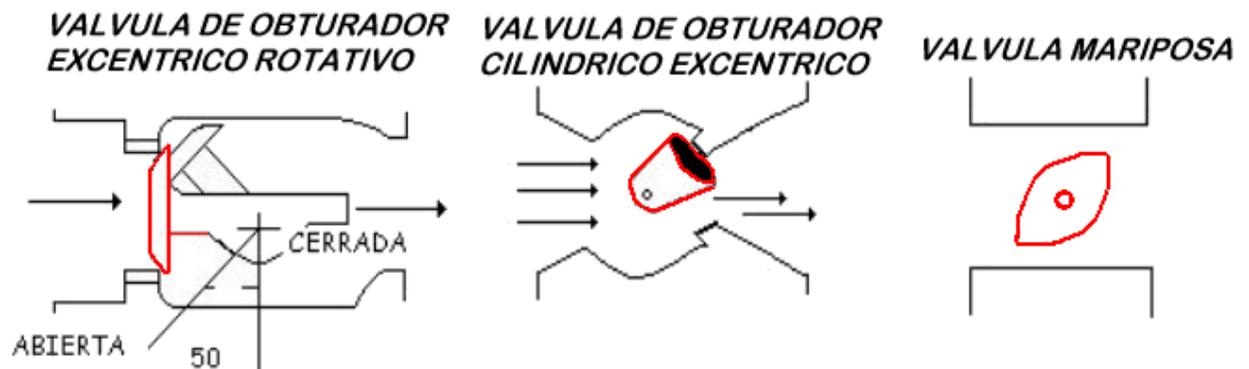
- ❑ **Válvula de Obturador Excéntrico Positivo:** Consiste en un movimiento rotativo de 50° unido a uno o dos brazos flexibles, posee un cierre hermético debido a un

revestimiento de teflón en la cara donde asienta el obturador, es adecuada para elementos viscosos estas válvulas pueden tener un cierre estanco mediante aros de teflón dispuestos en el asiento y se caracteriza por su gran capacidad de caudal, poseen una pérdida de carga admisible.

□ **Válvula de Obturador Cilíndrico Excéntrico:** Su nombre es debido a su obturador, posee las mismas cualidades que la anterior, esta diseñada para fluidos corrosivos y líquidos viscosos.

□ **Válvula De Mariposa:** El disco circular es ayudado por el servomotor, cuando la válvula esta totalmente abierta se encuentra a 90° y en una posición intermedia generalmente a 60° , maneja el control de grandes caudales a baja presión.

Figura 94. Tipos de válvulas



□ **Válvula de Bola:** El obturador es una esfera que ocasiona un corte adecuado usualmente en v, gira ayudada por el servomotor, sirve para fluidos negros o con sólidos en supresión.

La restricción para este cuerpo es una esfera sólida a la cual se le ha practicado una perforación (hueco) para proporcionar una área ajustable para el flujo. Al girar

la bola se cambia el área de flujo por lo que se tiene una influencia sobre la magnitud del mismo. El ejemplo de válvula de bola mostrado en la siguiente figura tiene un túnel a través de la esfera, de tal forma que al girar la bola se ajusta la fracción del túnel o apertura disponible para el flujo. Otros tipos de válvulas de bola tienen diferentes secciones removidas en la esfera para dar las propiedades deseadas.

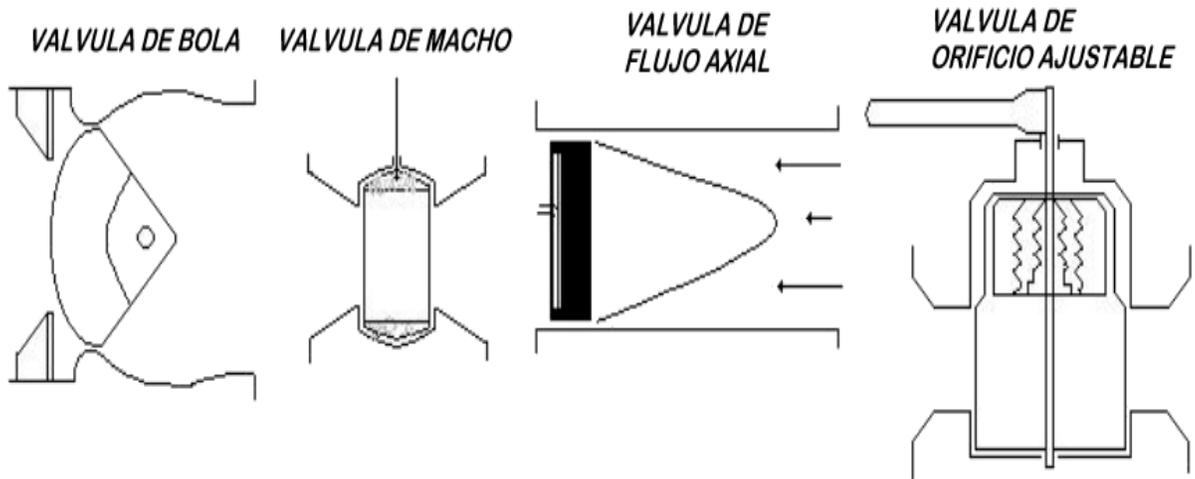
Dentro de este tipo de válvulas esta la de bola macho la cual posee un movimiento de 90° se puede utilizar para líquidos o gases y s regulación de caudal.

Características:

- Apta para el manejo de suspensiones muy viscosas o con fibras y sólidos.
 - Requiere motores de gran tamaño.
 - Precisan posicionadotes.
 - Deben ser estriadas de las líneas para mantenimiento.
 - Rangeabilidad típica de 50:1.
-
- **Válvula Orificio Ajustable:** El servomotor hace girar el cilindro para tapar las entradas de una camisa cilíndrica por proporciones o en su totalidad, se puede también ajustar manualmente. Posee una tajadera cilíndrica para fijar el caudal máximo. Se utiliza para combustibles gaseosos o líquidos, vapor, aire comprimido y liquido en general.

 - **Válvula De Flujo Axial:** Consiste en un diafragma accionado reumáticamente que mueve un pistón, el cual comprime al fluido hidráulico contra un obturador, se utiliza para gases.

Figura 95. Tipos de válvulas

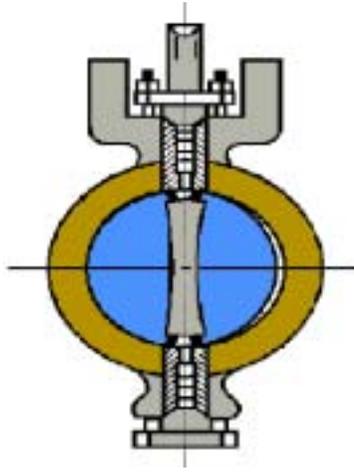


- ❑ **Válvula de mariposa:** La válvula de mariposa tiene un obturador plano (tipo hoja) que rota para ajustar la resistencia al flujo. Esta válvula presenta una caída de presión pequeña para flujos de gas.

Características:

- ❑ Buena disponibilidad para grandes diámetros.
- ❑ Bajo costo en la versión estándar (original).
- ❑ Susceptibles a cavitación y a ruido.
- ❑ Baja pérdida de carga.
- ❑ Diámetro hasta 150 pulgadas.
- ❑ El cierre hermético requiere de recubrimientos especiales.

Figura 96. Válvula mariposa



10.9 CRITERIOS DE SELECCIÓN

Para la escogencia de una buena válvula se deben tener en cuenta los siguientes pasos:

- El primer paso para la selección de una válvula de control involucra la recolección de todos los datos relevantes y completar la forma: ISA Form S20.50. Antes de dimensionar la válvula se debe establecer el tamaño de la tubería, y la determinación de la presión de suministro puede requerir la especificación de una bomba. El principiante podría tener que iterar respecto a la tubería necesaria, la presión de la bomba y la caída de presión a lo largo de la red de tuberías.
- Enseguida se requiere el tamaño de la válvula; seleccione el valor más pequeño de C_v que satisface el requerimiento máximo de C_v a 90% de apertura. Mientras realiza estos cálculos, se debe verificar lo referente a vaporización instantánea, cavitación, flujo sónico, y número de Reynolds para asegurarse de que se usan la ecuación y los factores de corrección adecuados. Ocurren tantas dificultades tanto por el sobrediseño como por el subdiseño de las válvulas. Adicionalmente una gran cantidad de "factores de seguridad" en una válvula que está casi cerrada durante la operación normal y tiene una rangabilidad pobre.

- El buen desempeño de la válvula de control se debe a la característica adecuada; usualmente los objetivos son un comportamiento lineal del lazo de control junto con una rangeabilidad aceptable.
- El cuerpo de la válvula puede seleccionarse basado en las características del ingeniero. Por lo general el tamaño de la válvula es igual al tamaño de la tubería o ligeramente menor, por ejemplo, una tubería de 3 pulgadas con una válvula globo de 2 pulgadas. Cuando el tamaño de la válvula es menor que la tubería proceso, se requiere un reductor a la entrada y una expansión a la salida para hacer la conexión a la tubería de proceso.
- Ahora se selecciona el actuador para proporcionar suficiente fuerza para posicionar el vástago y el obturador.
- Finalmente, se pueden agregar auxiliares para mejorar el desempeño. Con un propulsor (booster) se puede aumentar el volumen de la señal neumática en línea neumáticas grandes y cuando se tienen actuadores grandes. Se puede aplicar un posicionador para lazos de control lentos que manejen válvulas grandes o válvulas que usen grandes fuerzas del actuador o fricción. Si se espera una operación manual de la válvula, entonces es necesario un volante para operación manual.

11. CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS

11.1 CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE TEMPERATURA

Para realizar estas calibraciones⁸ se emplean los siguientes métodos: baños de temperatura, hornos y comprobadores potenciométricos.

11.1.1 Baño de temperaturas. Consiste en un tanque de acero inoxidable lleno de líquido, con un agitador incorporado, un termómetro patrón sumergido y un controlador de temperatura que actúa sobre un juego de resistencias calefactoras y sobre un refrigerador mecánico dotado de una bobina de refrigeración. El agitador mueve totalmente el líquido, disminuye los gradientes de temperaturas en el seno del líquido y facilita una transferencia rápida de calor; el termómetro patrón es de tipo laboratorio, con una gran precisión; el controlador de temperatura puede ser todo – nada, proporcional o proporcional más integral.

Los fluidos empleados en el baño son varios, dependiendo del campo de temperatura de trabajo.

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

Estos hornos son de temperatura controlada disponiendo de indicador-controlador, un termopar de precisión y un juego de resistencias de calentamiento, para obtener una calibración más precisa se pueden disponer en el interior del horno crisoles con sales específicas que se funden a temperaturas determinadas.

⁸ CREUS, Sole Antonio. Instrumentación industrial. 5ª edición. Barcelona- España: Alfaomega Marcombo S.A., 1993. p. 54

11.1.3 Comprobadores Potenciometricos. Se emplean para comprobar las características f.e.m-temperatura de los termopares, para medir la temperatura con un termopar y para calibrar los instrumentos galvanometricos y potenciometricos.

Constan de un galvanómetro, un elemento de estandarización de tensión y un reóstato de selección de f.e.m, combinado con un selector. El aparato puede medir y generar f.e.m en corriente continua con varios márgenes que van de 0-0.182 a 0-182 mV, y con tensiones por división de 0.0001 V a 0.1 mV respectivamente, su precisión es elevada, del orden del 0.2%.

Al momento de la calibración se debe tener en cuenta el efecto de autocompensacion de temperatura del instrumento. Para esto se coloca un termómetro de vidrio en la caja del instrumento y se procede del modo siguiente: primero se determina la temperatura de la unión fría del instrumento por lectura del termómetro de vidrio, segundo se determinan los mV correspondientes a la temperatura de la unios fría y los correspondientes a la temperatura a verificar del instrumento y por ultimo se realiza la diferencia algebraica entre los valores anteriores y se sitúa dicho valor en el comprobador debiendo el instrumento leer la temperatura a verificar.

11.2 CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE PRESIÓN

Para calibrar estos instrumentos pueden emplearse varios dispositivos, los cuales por lo general utilizan manómetros patrón.

Los manómetros patrona se emplean como testigos de la correcta calibración de los instrumentos de presión. Son manómetros de alta precisión con un valor mínimo de 0.2% de toda la escala; esta precisión se consigue de varias formas:

1. Dial con una superficie especular, de modo que la lectura se efectúa por coincidencia exacta del índice y de su imagen, eliminando así el error de paralelaje.
2. Dial con graduación lineal, lo que permite su fácil y rápida calibración.
3. Finura del índice y de las graduaciones de la escala.
4. Compensación de temperatura con un bimetal.
5. Tubo burdon de varias espiras.
6. Se consigue una mayor precisión situando marcas móviles para cada incremento de lectura del instrumento.

Los transmisores digitales inteligentes cambien pueden utilizarse como aparatos patrón de presión, debido a su elevada precisión del orden del $\pm 0.2\%$.

Para la calibración del manómetro patrón se consigue con el comprobador de manómetros de pesas.

Este manómetro de pesas consiste en una bomba de aceite a de fluido hidráulico con dos conexiones de salida, una conectada al manómetro patrón que se esta comprobando y la otra a un cuerpo de cilindro dentro del cual desliza un pistón de sección calibrada que incorpora un juego de pesas; la calibración se hace accionando la bomba hasta levantar el pistón con las pesas y haciendo girar estas con la mano; su giro libre indica que la presión es la adecuada, ya que el conjunto pistón-pesas esta flotando sin roces. Una válvula de alivio de paso fino y una válvula de desplazamiento permiten fijar exactamente la presión deseada cuando se cambian las pesas en la misma prueba para obtener distintas presiones o cuando se da inadvertidamente una presión excesiva.

Estos pistones pueden encontrarse de alta y de baja presión, con un juego de pesas que permite obtener márgenes muy variados, ejemplo 0-20, 2-100, 30-150, 70-350, 140-700 bar. La preescisión en la medida puede llegar a ser del orden de

0.1%, en el comprobador de manómetros se puede obtener una precisión del orden de $\pm 0.06\%$.

Otros métodos utilizados son las columnas de mercurio y las columnas de agua, utilizados por lo general en pruebas de campo, estas columnas junto con un juego de manómetros patrón, se disponen generalmente en un panel o banco de pruebas de instrumentos que incorporan un abomba de vacío y filtros manorreductores de aire de precisión conectados al aire de instrumentos de la planta; este conjunto permite calibrar y comprobar instrumentos tales como, manómetros, vacuómetros, controladores neumáticos, transmisores de nivel, etc, y en general cualquier instrumento que trabaje en el proceso o transmita señales neumáticas que estén comprendidas entre los márgenes de presión de los manómetros patrón y de las columnas de agua y de mercurio.

11.3 CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE FLUJO

Uno de los instrumentos mas utilizados para la medición de flujo⁹ son los rotametros, estos no pueden calibrarse, exceptuando la parte transmisora cuando la llevan incorporada.

Los rotametros para líquidos se comprueban haciendo pasar agua, de modo tal que la indicación del rotametro se mantenga en un valor constante y recogiendo el agua en un tanque de capacidad conocida o en un valor constante y recogiendo el agua en un tanque de capacidad conocida o en u deposito colocado sobre una bascula. Esta capacidad dividida por el tiempo transcurrido en la experiencia dará el caudal, que deberá coincidir con la indicación del rotametro, sin olvidar las correcciones de peso especifico, temperatura y viscosidad del fluido real comparado con el agua. La comprobación del rotametro también puede hacerse

⁹ CREUS, Sole Antonio. Instrumentación industrial. 5ª edición. Barcelona- España: Alfaomega Marcombo S.A., 1993. p. 54

intercalando otro rotámetro de precisión en serie y comparando las dos indicaciones.

Los rotámetros de gases se calibran con un rotámetro de precisión, igual que una para líquidos; otro sistema de calibración utilizado en rotámetros de menor tamaño, es emplear un tubo cilíndrico graduado con un pistón sellado mediante mercurio para evitar fugas. Al bajar el pistón con regularidad hace pasar aire a través del rotámetro bajo observación. El volumen de aire gastado dividido por la duración del ensayo, medida mediante un cronómetro, da el caudal que debe corresponderse con la posición del flotador afectada lógicamente de los coeficientes correspondientes.

11.4 CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE NIVEL

La mayoría de las mediciones de nivel utilizan instrumentos de nivel de presión diferencial; estos instrumentos se calibran colocándolos en el banco de pruebas con la conexión de alta a un manorreductor y a una columna de agua o de mercurio para simular el campo de medida y la conexión de baja abierta a la atmósfera; la parte transmisora neumática o electrónica se alimenta aparte y su señal de salida va a una columna de mercurio del banco (en caso de señal neumática) o a una maleta comprobadora de instrumentos electrónicos (en caso de señal eléctrica). La simulación del campo de medida se consigue transformando a presión la altura del líquido en el tanque del proceso y reduciendo esta presión con el manorreductor del banco de pruebas.

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

algunos instrumentos el fabricante proporciona pesos calibrados para simular el nivel, en este caso no hay necesidad de sumergir el flotador en el agua.

11.5 MANTENIMIENTO Y CALIBRACIÓN DE VÁLVULAS

El banco de prueba de válvulas de control consiste en un juego de bridas, una móvil y la otra fija, con una bomba manual para fijar la válvula, una bomba de agua con circuito intensificador de presión, reguladores de presión y un juego de manómetros patrón.

Las pruebas que se pueden efectuar en las válvulas de control son:

1. Prueba hidrostática del cuerpo de la válvula bombeando al agua a presión a través de la brida fija.
2. Prueba de estanqueidad de la estopada.
3. Prueba de estanqueidad de la válvula con el obturador en posición de cierre, midiendo la cantidad de agua de fuga en un tiempo dado y comparándola con la dada por el fabricante de la válvula; una cantidad excesiva indicara un desgaste anormal en el cierre obturador-asiento.
4. Prueba de funcionamiento de la válvula, medida de su histéresis y, calibración de la misma y prueba del posicionador.

El resto de características de la válvula son mas bien de interés para el fabricante que determina y garantiza dichos datos al usuario. Su determinación obliga a la contribución de bancos de pruebas costosos con instrumentos de medida de caudal, bombas de gran capacidad y tuberías de gran longitud, según sea el tamaño de la válvula.

12. MONTAJE DE INSTRUMENTACIÓN

El instrumentista debe tener pleno conocimiento para interpretar el típico de montaje suministrado por el cliente o derivado de la ingeniería de detalle que se esté desarrollando y está en la obligación de discutir con su supervisor o ingeniero residente cualquier duda que se le presente con el fin de garantizar el no desperdicio de material.

Antes de comenzar el montaje de la instrumentación se procede a inspeccionar cada instrumento. Las etapas a seguir para la instalación de instrumentos son las siguientes:

- Identificar el sitio de ubicación del instrumento de acuerdo a los planos.
- Verificar que el soporte este correctamente instalado.
- Verificar que el instrumento funciona y esta calibrado de acuerdo a lo especificado en el data sheet del instrumento.
- Montar el instrumento sobre el soporte de acuerdo a lo especificado en la norma ISA y siguiendo las indicaciones del fabricante.
- Realizar el conexionado al circuito de control.

12.1 MONTAJE DE INSTRUMENTOS INDICADORES

Para montar instrumentos de indicación se debe disponer el acceso adecuado para visualizarlos correctamente, conservando una visión desde cualquier ángulo frontal con relación a la carátula del instrumento.

Cuando el instrumento esté a nivel de piso se debe conservar una altura máxima de 1.5 metros con relación del centro del dial del instrumento. Cuando el instrumento tenga que estar por encima de 1.5 metros se debe tener en cuenta la inclinación del dial para una correcta visualización desde el piso.

Para los indicadores de tecnología electrónica el instrumentista debe tener la precaución de instalar el instrumento previendo la menor radiación de calor posible desde las tuberías de proceso.

Para los instrumentos de indicación análoga se debe tener en cuenta que el conexionado de las tomas debe tener la menor longitud posible sin olvidar prever la radiación de calor de las líneas de proceso.

12.2 MONTAJE DE INSTRUMENTOS TRANSMISORES

Para el montaje de instrumentos transmisores se debe conservar una altura máxima de 1.5 metros con relación al centro del instrumento y su ubicación depende del tipo de componente del proceso que se esté censando (gas, líquido o producto viscoso) lo que determinará de acuerdo a la norma ISA, si el instrumento va por debajo o por encima de la línea de proceso.

Para los transmisores de tecnología electrónica el instrumentista debe tener la precaución de instalar el instrumento previendo la menor radiación de calor posible desde las tuberías de proceso.

Para los instrumentos de transmisión neumática se debe tener en cuenta que el conexionado de las tomas debe tener la menor longitud posible sin olvidar prever la radiación de calor de las líneas de proceso.

Para los procesos cuya materia prima sean vapores, ácidos o líquidos calientes se aplicará la norma utilizando los sellos correspondientes para conseguir la protección del elemento primario del transmisor.

Las tomas de proceso a instrumento deben de llevar protección mecánica con una bandeja o similar con el fin de proteger el tubing.

Para el conexionado eléctrico se debe de aplicar la norma respecto de sí su ubicación es en área clasificada o en área no clasificada. (Conexionado que lo determinará el típico de montaje).

12.3 MONTAJE DE INSTRUMENTOS CONTROLADORES

Para el montaje de instrumentos controladores se debe conservar una altura máxima de 1.5 metros con relación al centro del instrumento, disponer el acceso adecuado para visualizarlos y configurarlo correctamente. Además el instrumentista debe tener disponible un P & ID, lazos para instalar y verificar que la estrategia de control sea la correcta.

Para los controladores de tecnología electrónica el instrumentista debe tener la precaución de instalar el instrumento en un lugar seguro y protegido contra radiaciones de calor o cualquier factor atmosférico.

Para los controladores neumáticos se debe tener en cuenta que el aire de instrumento este completamente seco y limpio.

Para los procesos cuya materia prima sean vapores, ácidos o líquidos calientes se aplicará la norma utilizando los sellos correspondientes para conseguir la protección del elemento primario del transmisor.

Las tomas de proceso a instrumento deben de llevar protección mecánica con una bandeja o similar con el fin de proteger el tubing.

Para el conexionado eléctrico se debe de aplicar la norma respecto de sí su ubicación es en área clasificada o en área no clasificada. (Conexionado que lo determinará el típico de montaje)

12.4 MONTAJE DE ELEMENTOS FINALES DE CONTROL

Para el montaje de los elementos finales de control se debe tener en cuenta, para su instalación el sentido del flujo de proceso, especificaciones técnicas y condiciones de operación del proceso a controlar respectivamente, dadas por el fabricante o persona encargada de la ingeniería.

13. TÍPICOS DE MONTAJE

13.1 TRANSMISORES FLUJO

Figura 97. Montaje de transmisores de flujo

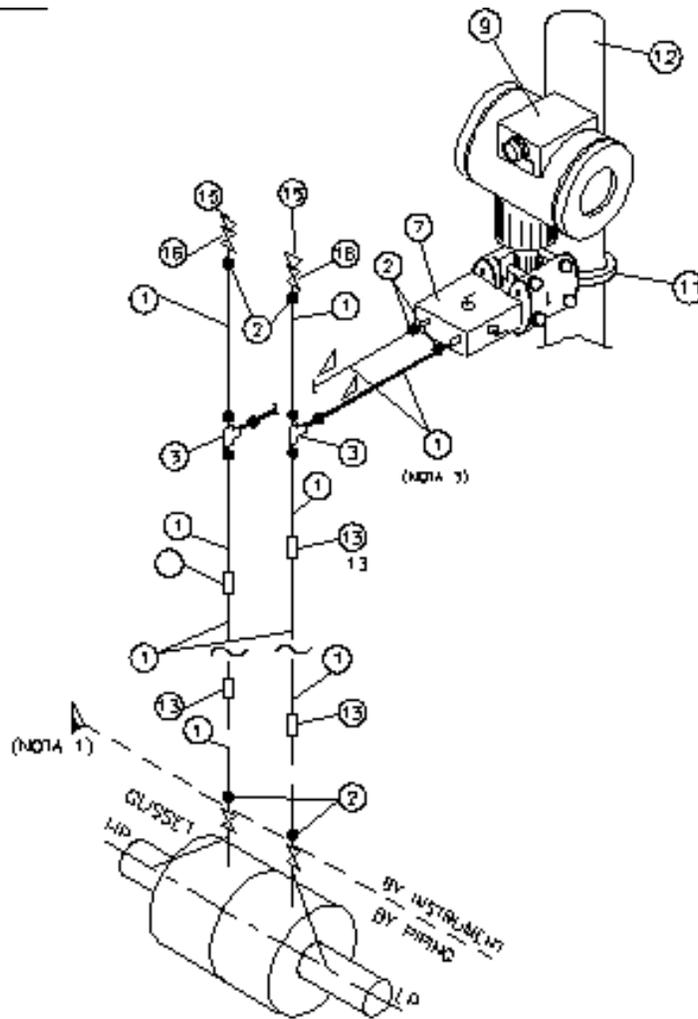


Figura 98. Transmisor de flujo de presión diferencial para gas

ITEM	DESCRIPTION
1	TUBING - 316-SS 1/2 IN. O.D. - 0.049"TH (NOTA 3)
2	STRAIGHT CONNECTOR- 1/2 IN. MNPTx1/2 IN. O.D. 316-SS
3	ALL TEE CONNECTOR - 1/2 IN. O.D. 316-SS
7	3 VALVES MANIFOLD 1/2 IN. NPT 316-SS
9	INSTRUMENT - dPT
11	BRACKET 2 IN. PIPE INCLUDED ON INSTRUMENT
12	SUPPORT 2 IN. PIPE
13	UNION 1/2 IN. O.D. x 1/2 IN. O.D. 316-SS
15	PLUG 1/2 IN. NPT 316-SS THREADED
16	BALL VALVE 1/2 IN. NPT 316-SS

Figura 99. Transmisión de presión diferencial para vapor

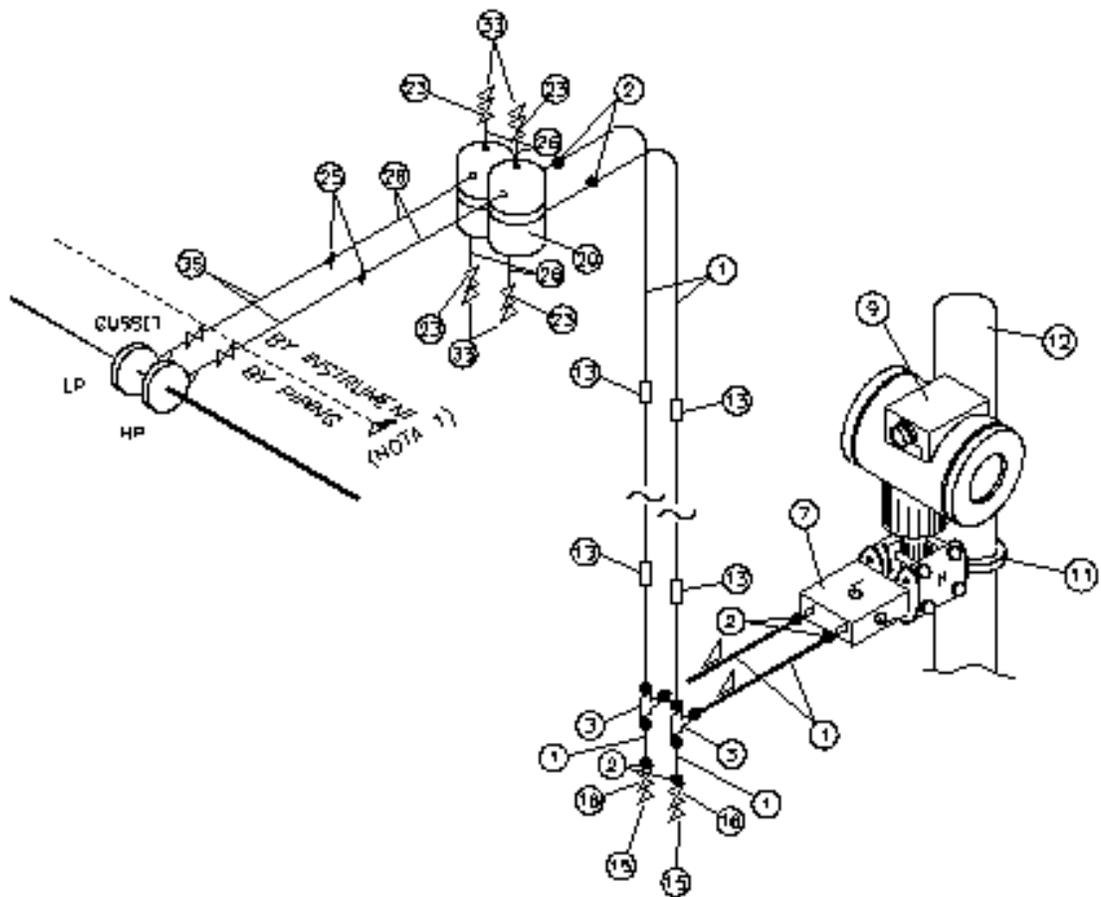


Figura 100. Descripción

ITEM	DESCRIPTION
1	TUBING - 316-SS 1/2 IN. O.D. - 0.049"TH
2	STRAIGHT CONNECTOR- 1/2 IN. MNPTx1/2 IN. O.D. 316-SS
3	ALL TEE CONNECTOR - 1/2 IN. O.D. 316-SS
7	3 VALVES MANIFOLD 1/2 IN. NPT 316-SS
9	INSTRUMENT - DPT
11	BRACKET 2 IN. PIPE INCLUDED ON INSTRUMENT
12	SUPPORT 2 IN. PIPE
13	UNION 1/2 IN. O.D. x 1/2 IN. O.D. 316-SS
15	PLUG 1/2 IN. NPT 316-SS THREADED
16	BALL VALVE 1/2 IN. NPT, 316-SS
20	SEAL POT, 3 IN. x 11 IN.
23	BALL VALVE 1/2 IN. FNPT, BRASS
25	UNIVERSAL UNION - 1/2 IN., A-105 GALV., 3000# SCR'D
26	PIPE NIPPLE 1/2 IN., A-106 GALV. SCH-80, L = 3 IN.
33	HEX HEAD PLUG 1/2 IN. , A-105 GALV. , MNPT

Figura 101. Transmisor de flujo de presión diferencial para liquido

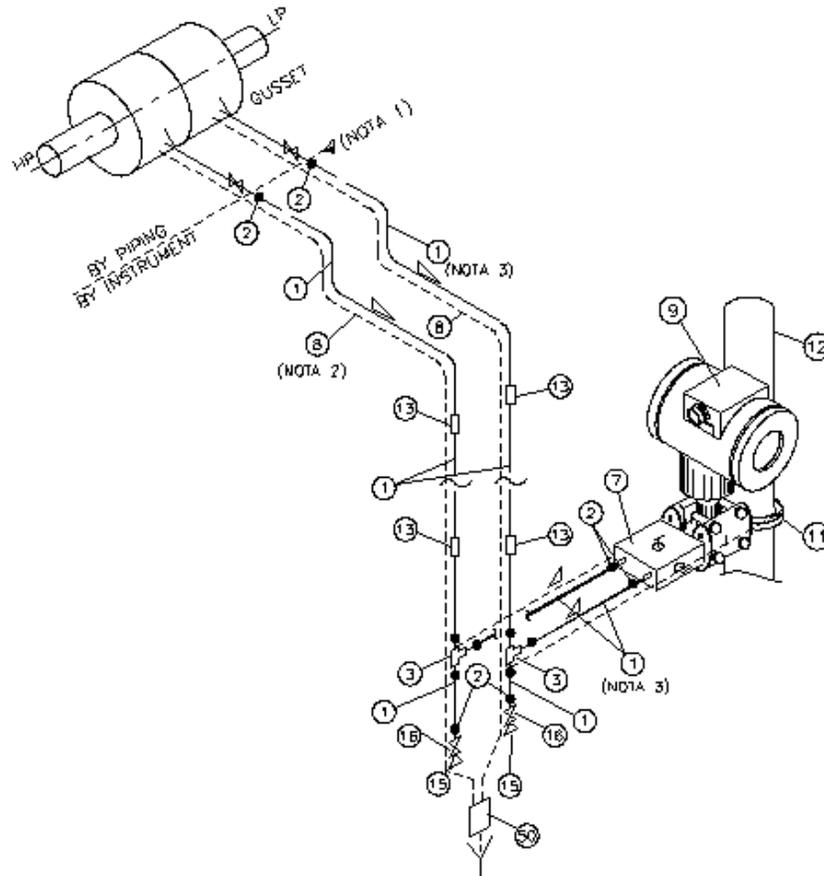


Figura 102. Descripción

ITEM	DESCRIPTION
1	TUBING - 316-SS 1/2 IN. O.D. - 0.049"TH (NOTA 3)
2	STRAIGHT CONNECTOR- 1/2 IN. MNPTx1/2 IN. O.D. 316-SS
3	ALL TEE CONNECTOR - 1/2 IN. O.D. 316-SS
7	3 VALVES MANIFOLD 1/2 IN. NPT 316-SS
8	COPPER TUBING 1/4 IN. O.D. (NOTA 2)
9	INSTRUMENT - dPT
11	BRACKET 2 IN. PIPE INCLUDED ON INSTRUMENT
12	SUPPORT 2 IN. PIPE
13	UNION 1/2 IN. O.D. x 1/2 IN. O.D. 316-SS
15	PLUG 1/2 IN. NPT 316-SS THREADED
16	BALL VALVE 1/2 IN. NPT 316-SS
50	STEAM TRAP

13.2 TRANSMISORES DE NIVEL

Figura 103. Montaje de transmisor de nivel presión diferencial

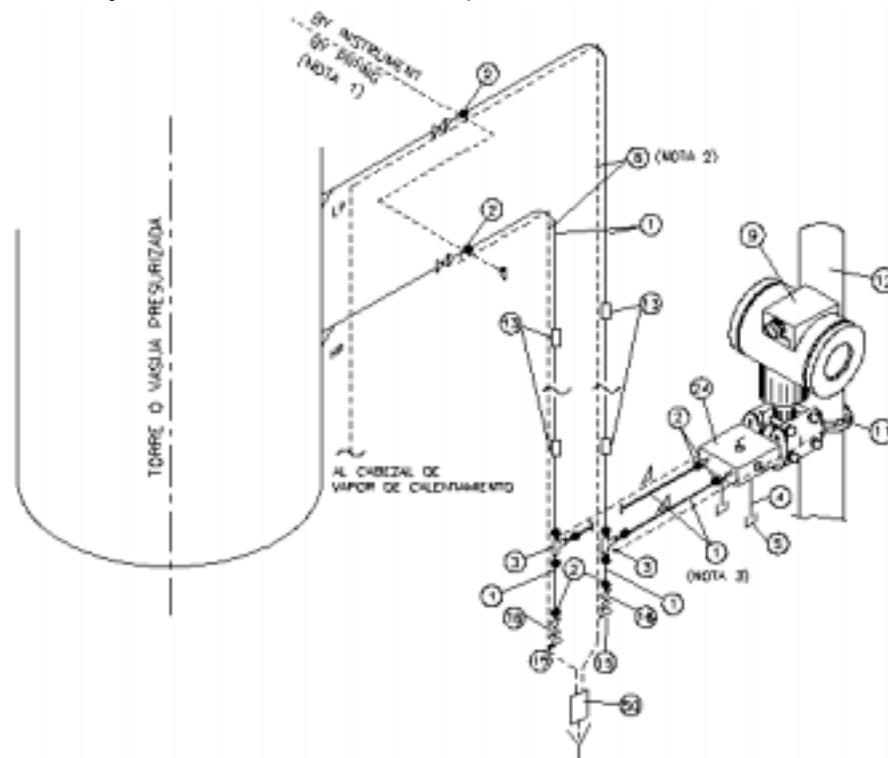
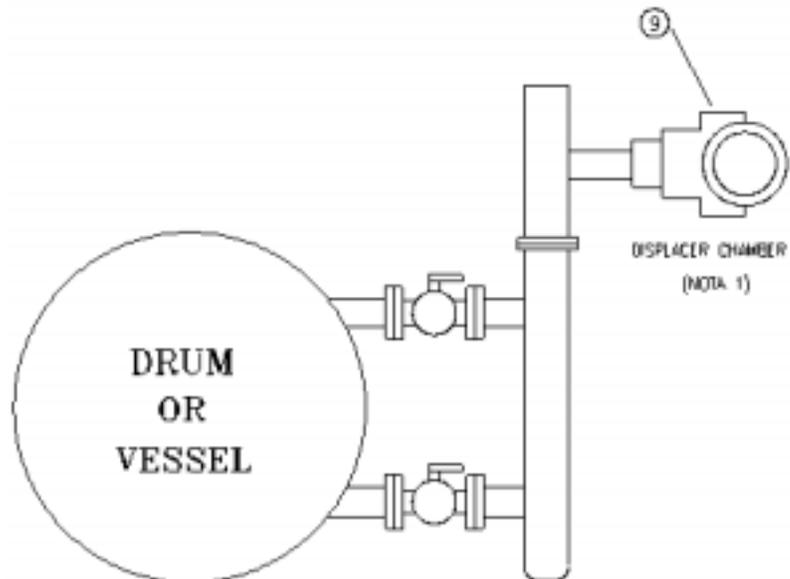


Figura 104. Descripción

ITEM	DESCRIPTION
1	TUBING - 316-SS 1/2 IN. O.D. - 0.049" TH (NOTA 3)
2	STRAIGHT CONNECTOR- 1/2 IN. MNPTx1/2 IN. O.D. 316-SS
3	ALL TEE CONNECTOR - 1/2 IN. O.D. 316-SS
4	NIPPLE THREADED 1/2 IN. NPT 316-SS L=3 IN. SCH 80
5	CAP. 1/2 IN. NPT 316-SS THREADED
8	COPPER TUBING 1/4 IN. O.D. (NOTA 2)
9	INSTRUMENT - dPT
11	MOUNTING BRACKET FOR 2 IN. PIPE (INCLUDED IN INSTRUMENT)
12	SUPPORT 2 IN. PIPE - MODEL B
13	UNION 1/2 IN. O.D. x 1/2 IN. O.D. 316-SS
15	PLUG 1/2 IN. NPT 316-SS THREADED
16	BALL VALVE 1/2 IN. NPT 316-SS
24	5 VALVE-MANIFOLD 1/2 IN. NPT 316-SS
50	STEAM TRAP

Figura 105. Transmisor de nivel tipo desplazador



13.3 TRANSMISORES DE PRESIÓN

Figura 106. Transmisor de presión con pote inferior

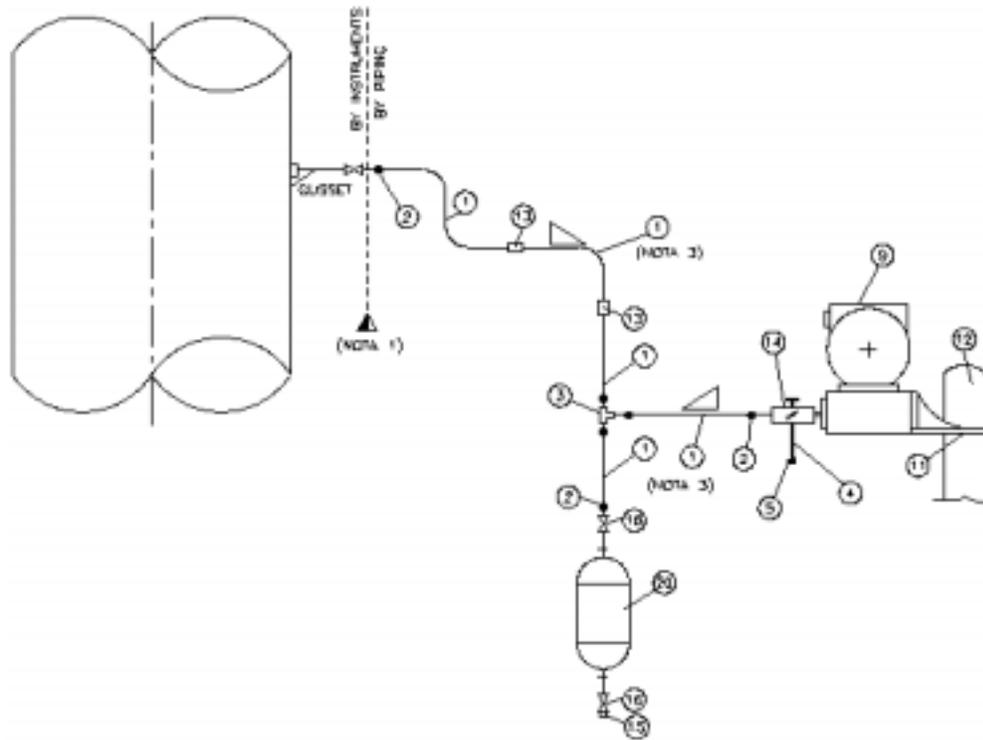


Figura 107. Descripción

ITEM	DESCRIPTION
1	TUBING - 316-SS 1/2 IN. O.D. - 0.049TH (NOTA 3)
2	STRAIGHT CONNECTOR- 1/2 IN. MNPTx1/2 IN. O.D. 316-SS
3	ALL TEE CONNECTOR - 1/2 IN. O.D. 316-SS
4	NIPPLE THREADED 1/2 IN. NPT 316-SS L= 3 IN. SCH 80
5	CAP. 1/2 IN. NPT 316-SS THREADED
9	INSTRUMENT - PT
11	BRACKET 2 IN. PIPE INCLUDED ON INSTRUMENT
12	SUPPORT 2 IN. PIPE
13	UNION 1/2 IN. O.D. x 1/2 IN. O.D. 316-SS
14	2 VALVES MANFOLD 1/2 IN. NPT 316-SS
15	PLUG 1/2 IN. NPT 316-SS THREADED
16	BALL VALVE 1/2 IN. NPT, 316-SS
20	CONDENSED POT, 3 IN. x 11 IN.

Figura 108. Transmisor con purga de aire

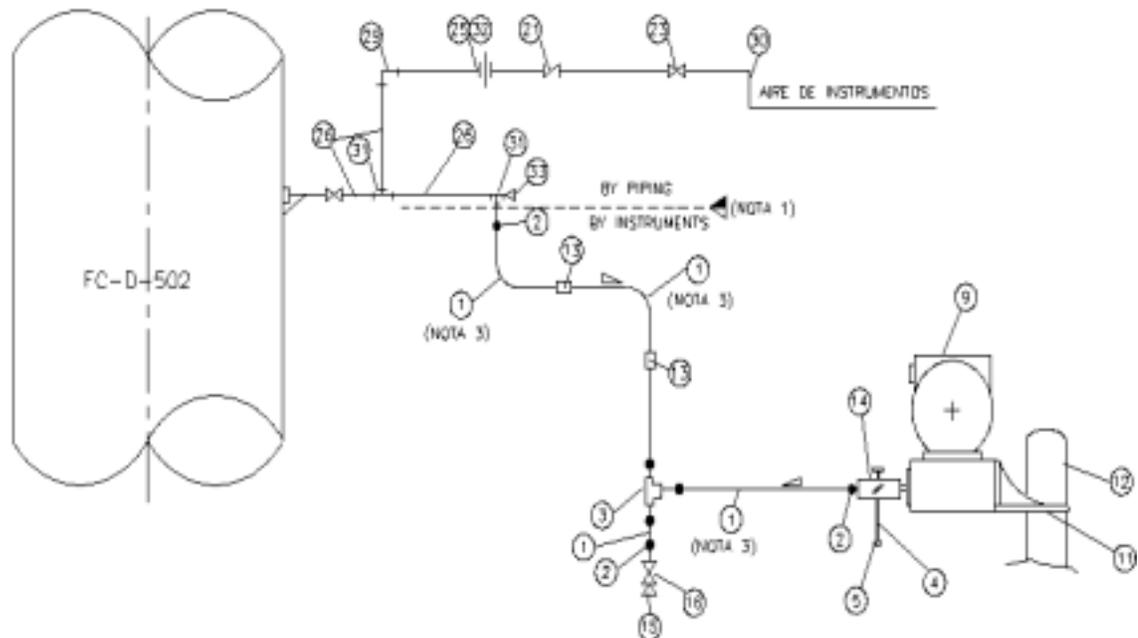


Figura 109. Descripción

ITEM	DESCRIPTION
1	TUBING - 316-SS 1/2 IN. O.D. - 0.049"TH (NOTA 3)
2	STRAIGHT CONNECTOR- 1/2 IN. MNPTx1/2 IN. O.D. 316-SS
3	ALL TEE - CONNECTOR 1/2 IN. O.D. 316-SS
4	NIPPLE THREADED 1/2 IN. NPT 316-SS L = 3 IN. SCH 80
5	CAP. 1/2 IN. NPT 316-SS THREADED
9	INSTRUMENT - PT
11	BRACKET 2 IN. PIPE INCLUDED ON INSTRUMENT
12	SUPPORT 2 IN. PIPE
13	UNION 1/2 IN. O.D. x 1/2 IN. O.D. 316-SS
14	2 VALVES MANIFOLD 1/2 IN. NPT 316-SS
15	PLUG 1/2 IN. NPT 316-SS THREADED
16	BALL VALVE 1/2 IN. NPT, 316 - 55
21	CHECK VALVE 1/2 IN. NPT, C.S.
23	BALL VALVE 1/2 IN. FNPT, BRASS
25	UNIVERSAL UNION - 1/2 IN., A-105 GALV., 3000# SCR'D
26	NIPPLE - 1/2 IN. NPT., A-106 GALV. SCH-80 L = 3 IN.
29	ELBOW 90, 1/2 IN., A-105 GALV., 3000# SCR'D
30	PIPE 1/2 IN., A-106 GALV. SCH-80
31	PIPE TEE 1/2 IN., A-105 GALV. 3000# SCR'D
32	RESTRICTION ORIFICE (RO), 1/32 IN. HOLE, 1/16 IN. TH

Figura 110. Transmisor de presión para líquidos

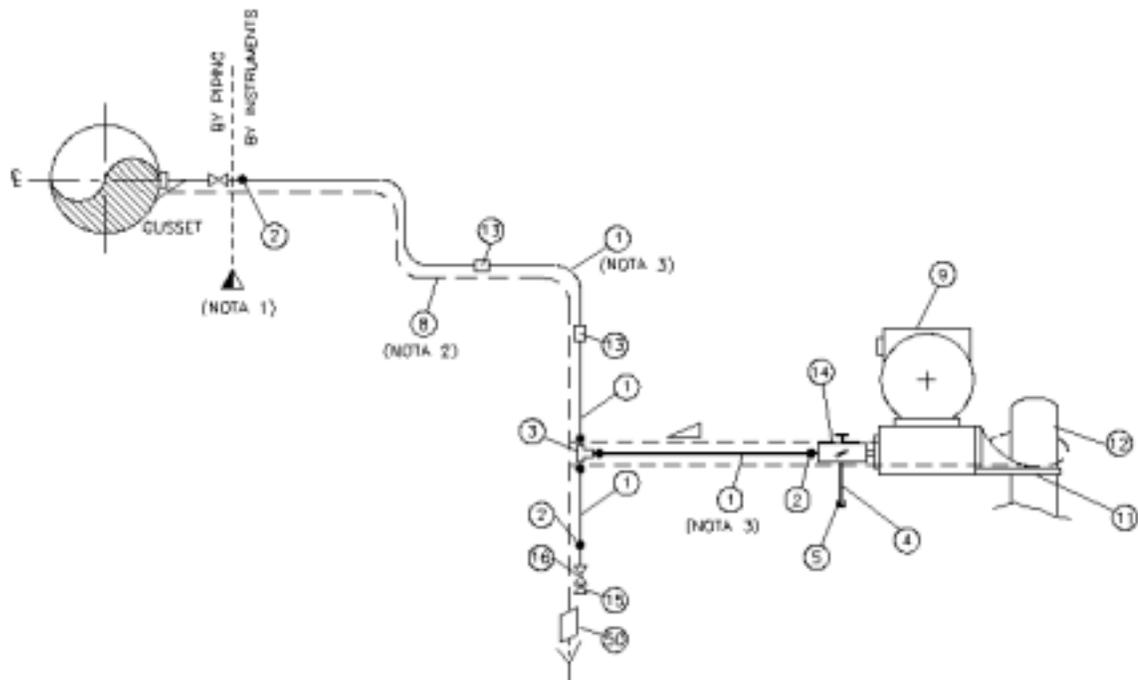


Figura 111. Descripción

ITEM	DESCRIPTION
1	TUBING - 316-SS 1/2 IN. O.D. - 0.049"TH (NOTA 3)
2	STRAIGHT CONNECTOR - 1/2 IN. MNPT x 1/2 IN. O.D. 316 SS
3	ALL TEE CONNECTOR - 1/2 IN. O.D. 316-SS
4	NIPPLE THREADED 1/2 IN. NPT 316-SS L=6 IN. SCH 80
5	CAP. 1/2 IN. NPT 316-SS THREADED
8	COPPER TUBING 1/4 IN. O.D.
9	INSTRUMENT- PT
10	UNION 1/2 IN. NPT - WELDED & THREADED
11	BRACKET 2 IN. PIPE INCLUDED ON INSTRUMENT
12	SUPPORT 2 IN. PIPE
13	UNION 1/2 IN. O.D. x 1/2 IN. O.D. 316-SS
14	2 VALVES MANIFOLD 1/2 IN. NPT 316-SS
15	PLUG 1/2 IN. NPT 316-SS THREADED
16	BALL VALVE 1/2 IN. NPT, 316-SS
50	STEAM TRAP

Figura 112. Transmisor de presión para vapor

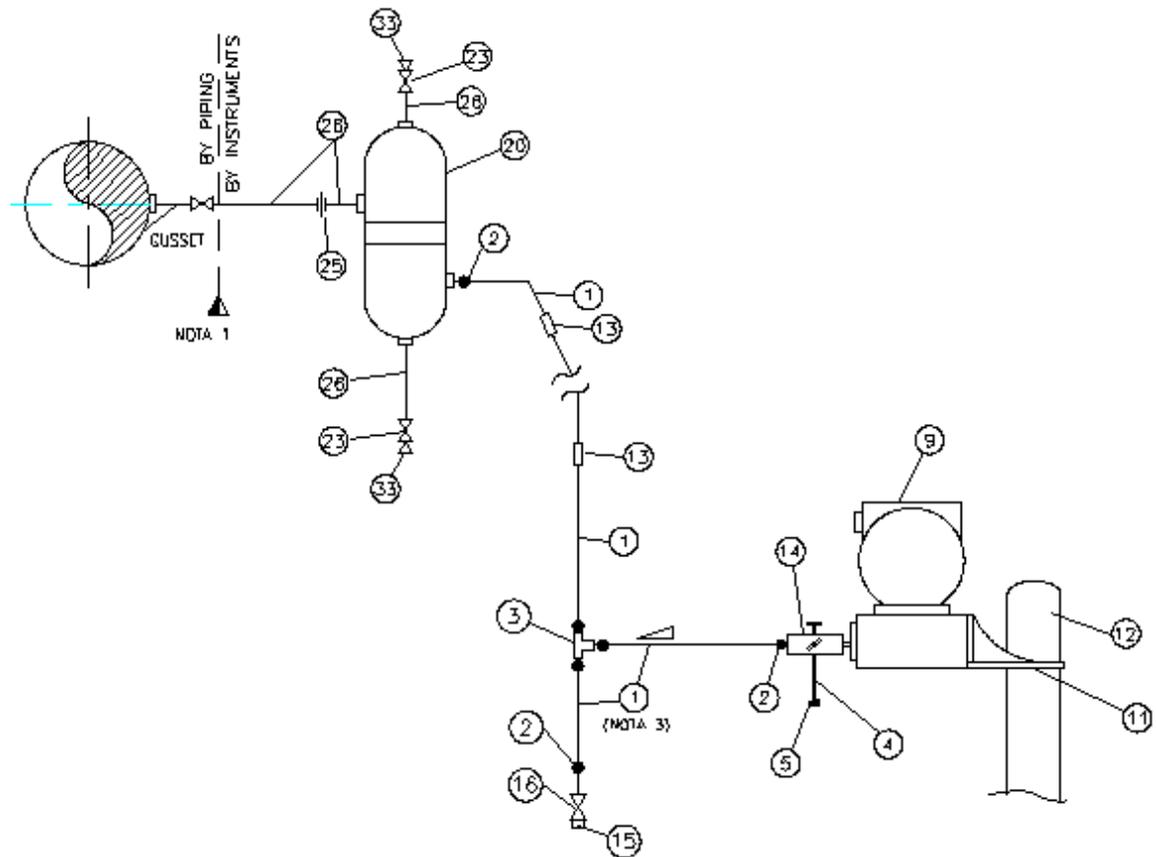


Figura 113. Descripción

ITEM	DESCRIPTION
1	TUBING - 316-SS 1/2 IN. O.D. - 0.049"TH
2	STRAIGHT CONNECTOR- 1/2 IN. MNPTx1/2 IN. O.D. 316-SS
3	ALL TEE CONNECTOR - 1/2 IN. O.D. 316-SS
4	NIPPLE THREADED 1/2 IN. NPT 316-SS L= 3 IN. SCH 80
5	CAP. 1/2 IN. NPT 316-SS THREADED
9	INSTRUMENT -PT
11	BRACKET 2 IN. PIPE INCLUDED ON INSTRUMENT
12	SUPPORT 2 IN. PIPE
13	UNION 1/2 IN. O.D. x 1/2 IN. O.D. 316-SS
14	2 VALVES MANFOLD 1/2 IN. NPT 316-SS
15	PLUG 1/2 IN. NPT 316-SS THREADED
16	BALL VALVE 1/2 IN. NPT, 316-SS
20	SEAL POT, 3 IN. x 11 IN.
23	BALL VALVE 1/2 IN. FNPT, BRASS
25	UNIVERSAL UNION - 1/2 IN., A-105 GALV., 3000# SCR'D
26	PIPE NIPPLE 1/2 IN., A-106 GALV. SCH-80, L = 3 IN.
33	HEX HEAD PLUG 1/2 IN., A-105 GALV., MNPT

13.4 TRANSMISORES DE TEMPERATURA

Figura 114. Transmisor de temperatura con termopozo

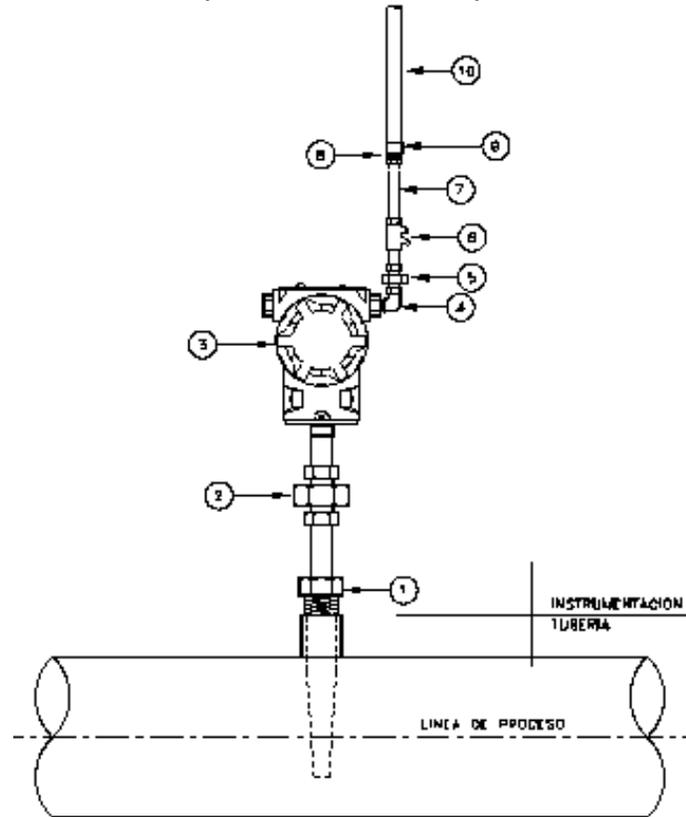


Figura 115. Descripción

10	TUBO CONDUIT 3/4" EXTRAPESADO
9	UNION CONDUIT DE 3/4"
8	REDUCCION CONDUIT 3/4"x1/2"
7	FLEXICONDUIT MET. 1/2" NPTMx.40 MT.
6	SELLO CORTAFUEGO CON DREN 1/8"
5	UNION UNIVERSAL CONDUIT 1/2" UNY
4	CODO CONDUIT 1/2"
3	TRANSMISOR TEMPERATURA (SUM.ECOPETROL)
2	ACOPLE TERMOPOZO (SUM. ECOPETROL)
1	TERMOPOZO (SUMNISTRO ECOPETROL)
ITEM	DESCRIPCION
L I S T A D E M A T E R I A L E S	

13.5 VÁLVULAS DE CONTROL

Figura 116. Montaje de válvula de control

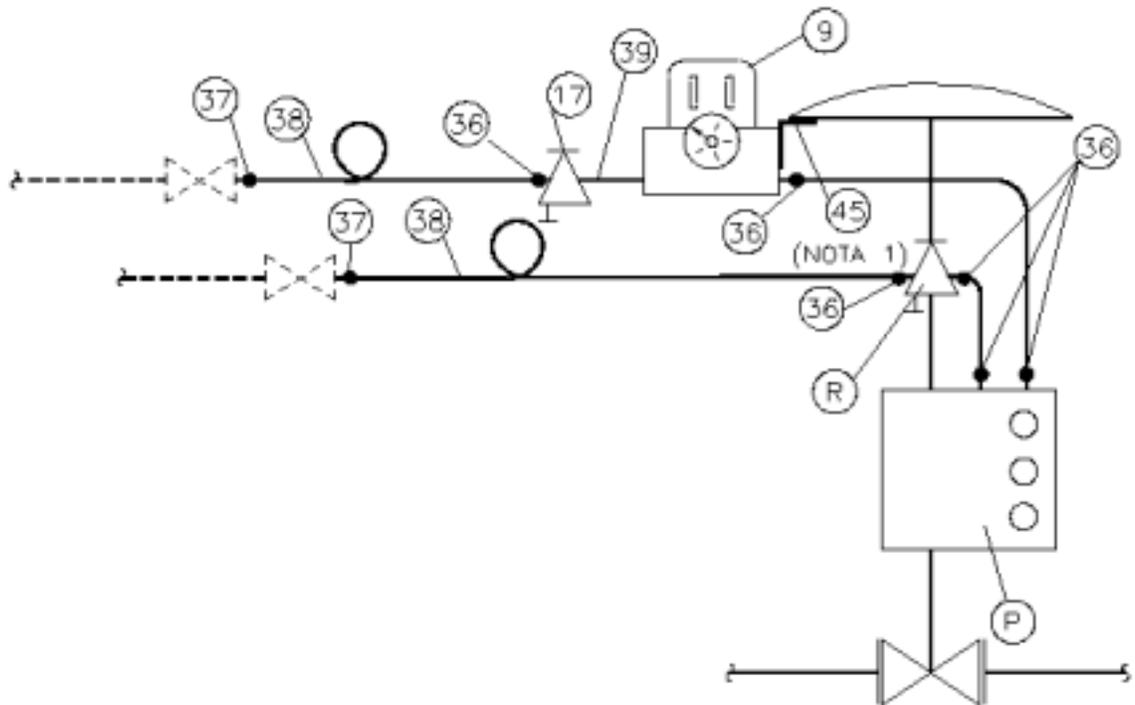


Figura 117. Descripción

ITEM	DESCRIPTION
P	EXISTING POSITIONER
R	EXISTING PRESSURE REGULATOR (R)
9	INSTRUMENT - I/P CONVERTER †
17	AIR PRESSURE REGULATOR 3-50 PSI - 1/4 IN. FNPT
36	STRAIGHT CONNECTOR- 1/4 IN. MNPTx1/4 IN. O.D. 316-SS
37	STRAIGHT CONNECTOR- 1/2 IN. MNPTx1/4 IN. O.D. 316-SS
38	TUBING - 316-SS - 1/4 IN. O.D. - 0.035TH
39	NIPPLE THREADED 1/4 IN. NPT C.S. L=3 IN. SCH 80
45	G.S. SUPPORT - ANGLE 2 IN. X 1/4 IN. - L= 3 1/2 IN. (NOTA 1)

Figura 118. Válvula con posicionador

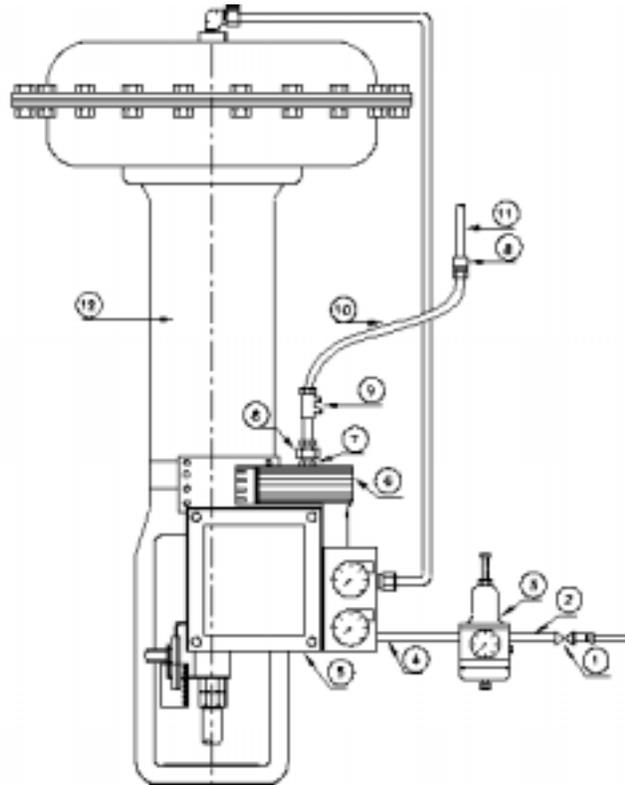


Figura 119. Descripción

12	V.V. NEUMATICA (SUM. ECOPETROL)
11	TUBO CONDUIT 3/4"
10	FLEXICONDUIT METALICO 3/4" x 0.30M
9	SELLO CORTAFUEGO DE 3/4" H-M
8	UNION UNIVERSAL CONDUIT DE 3/4"
7	RED. CONDUIT 3/4" x 1/2"
6	CONVERTIDOR I/P (SUM. ECOPETROL)
5	POSICIONADOR (SUMINISTRO ECOPETROL)
4	NIPLE 1/2" x 6" SCH 20 A.C.
3	REGULADOR PARA AIRE 0-60 PSI 1/2"
2	NIPLE 1/2" x 4" SCH 20 A.C.
1	V.V. COMPUERTA 1/2" 300#
ITEM	DESCRIPCION
LISTA DE MATERIALES	

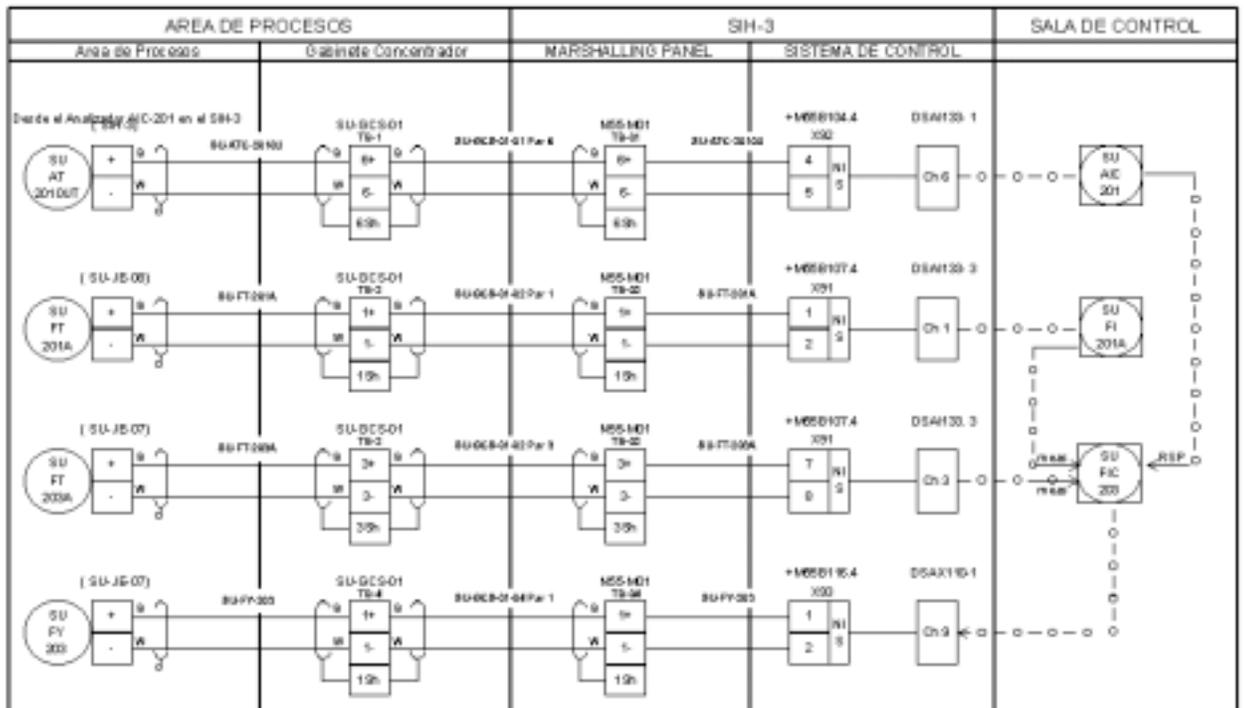
14. PRUEBA DE LAZO

Comprobación con equipos de medición de la asociación de los instrumentos que en él intervienen.

DESARROLLO

El instrumentista debe tener los planos de los diagramas de lazos¹⁰ para identificar los instrumentos asociados al lazo y su estrategia de control.

Figura 120. Plano diagrama de lazos



Se verifica que el instrumento a intervenir este aislado del proceso (que no este en servicio) y conecta un instrumento de medición o patrón como referencia.

¹⁰ Ver carpeta de Anexos

Se simula la variable de proceso entre los rangos de operación mínimos, máximos y normal, para el caso de los instrumentos digitales o de alarmas solo se simula la variable de operación del instrumento.

Durante la ejecución de este procedimiento se va diligenciando el registro tomando como base los valores obtenidos en las pruebas

Si el instrumento llegase a presentar error el instrumentista deberá según sea el error, calibrar en campo o desmontar el instrumento para calibrarlo en un laboratorio.

15. CONCLUSIONES

Los principios básicos de la física y la química proveen la base para entender la instrumentación de procesos, mientras que la selección del equipo apropiado depende de las necesidades de la aplicación específica.

Para poder mejorar la calidad de los productos y poder tener un mejor control del proceso, es necesario conocer como y que tanto influye la medición de todos los parámetros o variables que influyen en un proceso de fabricación o de transformación de materia prima; por lo que el conocimiento de los instrumentos de medición y su función dentro de dicho proceso (operador) como para el ingeniero o director de proyecto.

Con el presente trabajo intentamos encaminar al estudiante dentro de área de la instrumentación industrial ofreciéndole los conceptos básicos que la rigen y la diversidad de variables (señales) e instrumentos que existen.

16. BIBLIOGRAFÍA

CREUS SOLE, Antonio. Instrumentación Industrial. 5ª Edición. Barcelona- España: Alfaomega Marcombo S.A., 1993. p. 54

CONSIDINE DOUGLAS M. Manual de Instrumentación Aplicada. Tomo I. España: Continental S.A., 1972. p. 54

CONSIDINE DOUGLAS M., Manual de Instrumentación Aplicada. Tomo II. España: Continental S.A., 1972. p. 54

Catálogos de Instrumentación de FOXBORO, ROSEMOUNT y WIKA.