



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ESCOGENCIA DE LOS ELEMENTOS PRIMARIOS  
PARA MEDICIÓN DE PRESIÓN EN  
SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS**

**Billy Noé Martínez Cifuentes**  
**Asesorado por el Ing. Julio Edgar Castillo Rojas**

**Guatemala, abril de 2008**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCOGENCIA DE LOS ELEMENTOS PRIMARIOS  
PARA MEDICIÓN DE PRESIÓN EN  
SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

**BILLY NOÉ MARTÍNEZ CIFUENTES**

ASESORADO POR EL ING. JULIO EDGAR CASTILLO ROJAS

A CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, ABRIL DE 2008

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

Decano	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Vocal I	Inga. Glenda Patricia García Soria
Vocal II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
Vocal III	Ing. Miguel Angel Dávila Calderón
Vocal IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruíz
Vocal V	
Secretaria	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXÁMEN GENERAL PRIVADO**

Decano	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Examinador	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
Examinador	Ing. Francisco Javier González López
Examinador	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Secretaria	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ESCOGENCIA DE LOS ELEMENTOS PRIMARIOS  
PARA MEDICIÓN DE PRESIÓN EN  
SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 26 de febrero de 2007.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Billy Noé Martínez Cifuentes". The signature is stylized and includes a small "n" below the name.

**BILLY NOÉ MARTÍNEZ CIFUENTES**

Guatemala, 17 de enero de 2008

Ingeniero  
Otto Fernando Andrino  
Coordinador Área Electrotecnia  
Escuela Mecánica Eléctrica  
USAC

Ing. Andrino:

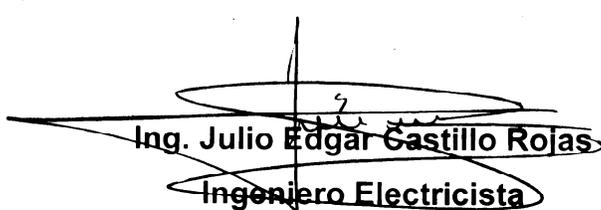
Por este medio hago de su conocimiento que he asesorado el trabajo de graduación del estudiante universitario BILLY NOÉ MARTÍNEZ CIFUENTES, titulado: "Escogencia de los Elementos Primarios Para Medición de Presión en Sistemas de Automatización de Procesos".

Después de haber revisado y corregido dicho trabajo, considero que llena los requisitos para su aprobación final.

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Cordialmente.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



Ing. Julio Edgar Castillo Rojas

Ingeniero Electricista

Colegiado No. 1604



Guatemala, 31 de MARZO 2008.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director  
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
**Escogencia de los Elementos Primarios Para Medición de Presión en  
Sistemas de Automatización De Procesos,** del estudiante, Billy Noé  
Martínez Cifuentes, por considerar que cumple con los requisitos  
establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

  
Ing. Otto Fernando Andriano González  
Coordinador Área de Electrotecnia

OFAG/sro





FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante: Billy Noé Martínez Cifuentes titulado: **Escogencia de los Elementos Primarios Para Medición de Presión en Sistemas de Automatización De Procesos.** procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

DIRECTOR



GUATEMALA, 01 DE ABRIL 2,008.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ESCOGENCIA DE LOS ELEMENTOS PRIMARIOS PARA MEDICIÓN DE PRESIÓN EN SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS**, presentado por el estudiante universitario **Billy Noé Martínez Cifuentes**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
DECANO



Guatemala, abril de 2008

/cc  
c.c. archivo.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

Dios Todopoderoso: Por todo cuanto hoy tengo y soy, por su dulce compañía en cada momento de mi vida.

Ingeniero: Julio Edgar Castillo Rojas, por su apoyo, confianza, y su valiosa asesoría en este trabajo de graduación.

## **RECONOCIMIENTOS**

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Facultad de Ingeniería, USAC.

Representación y Servicios Técnicos y Electrónicos Sociedad Anónima.

Claustro de catedráticos que contribuyen a la formación de profesionales de la ingeniería.

## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **MIS PADRES:**

Noé Isaac Martínez  
Vila Violeta Cifuentes  
Por su amor y apoyo incondicional.

### **ROXANA:**

Por compartir conmigo este bello sueño.

### **MI HERMANO:**

Marco Vinicio, por su solidaridad.

### **MIS ABUELOS:**

Por su apoyo y sus consejos.

### **MI FAMILIA:**

Por sus muestras de interés y apoyo.

### **MIS AMIGOS:**

Por todos los buenos momentos, que me han colmado de los mejores recuerdos.

### **MIS MAESTROS:**

Por sus aportes a lo largo de mi vida.

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b>	<b>XI</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>XIII</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XV</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>XVII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>XIX</b>
<b>1. TRANSMISORES DE PRESIÓN</b>	
1.1 Definiciones	1
1.1.1 Campo de medida	1
1.1.2 Alcance	3
1.1.3 Error	3
1.1.4 Incertidumbre en la medición	4
1.1.5 Exactitud	7
1.1.6 Precisión	7
1.1.7 Zona muerta	9
1.1.8 Sensibilidad	9
1.1.9 Repetibilidad	10
1.1.10 Histéresis	11
1.1.11 Otros términos	12
1.2 Clases de instrumentos	15
1.2.1 En función del instrumento	16
1.2.2 En función de la variable de proceso	22
1.3 Transmisores	24

1.3.1	Generalidades	24
1.3.2	Transmisores electrónicos	28
1.3.2.1	Transmisor electrónico de equilibrio de fuerzas	28
1.3.2.1.1	Detector de posición de inductancia	28
1.3.2.1.2	Transformador diferencial	30
1.3.2.2	Transmisores digitales	30
1.3.3	Comunicaciones	38
1.3.4	Comparación de transmisores	44
<b>2</b>	<b>MEDICIÓN DE PRESIÓN</b>	<b>45</b>
2.1	Unidades y clases de presión	45
2.2	Elementos mecánicos	48
2.3	Elementos neumáticos	51
2.4	Elementos electromecánicos	51
2.4.1	Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas	52
2.4.2	Transductores resistivos	55
2.4.3	Transductores magnéticos	56
2.4.3.1	Transductores de inductancia variable	56
2.4.3.2	Transductores de reluctancia variable	57
2.4.4	Transductores capacitivos	59
2.4.5	Galgas extensiométricas	60
2.4.6	Transductores piezoeléctricos	63
2.5	Elementos electrónicos de vacío	64
2.5.1	Transductores mecánicos de fuelle y diafragma	65
2.5.2	Medidor McLeod	65
2.5.3	Transductores térmicos	65
2.5.4	Transductores de ionización	68

<b>3</b>	<b>APLICACIONES DE LOS TRANSMISORES DE PRESIÓN, EN LA MEDICIÓN DE FLUJO Y NIVEL</b>	
3.1	Instrumentos de presión diferencial para la medición de flujo	71
3.1.1	Fórmula general	72
3.1.2	Elementos de presión diferencial	90
3.1.3	Placa de orificio	92
3.1.4	Medidor tipo cuña ( <i>WEDGE</i> )	95
3.1.5	Medidor tipo cono	97
3.1.6	Tubo Pitot	98
3.1.7	Tubo Pitot promedio o Annubar	101
3.1.8	Toberas	102
3.1.9	Tubo Venturi	103
3.2	Elemento Transmisor de Flujo	105
3.2.1	Transmisores de fuelle y de diafragma	105
3.2.2	Transmisor de presión multivariable	109
3.2.2.1	Compensación por temperatura en la medición de flujo	110
3.2.2.2	Compensación por presión en la medición de flujo	111
3.2.2.3	Impacto de la compensación en la medición de flujo	112
3.3	Medición de nivel de líquidos	115
3.3.1	Medidor manométrico	115
3.3.2	Medidor tipo membrana	116
3.3.3	Medidor tipo burbujeo	117
3.3.4	Medidor de presión diferencial	118
3.4	Medición de la densidad de un fluido	120
<b>4</b>	<b>CRITERIOS PARA SELECCIÓN DEL ELEMENTO PRIMARIO</b>	
4.1	Elementos primarios para la medición de presión	123

4.1.1	Escogencia del tipo de fluido de relleno según su aplicación	124
4.1.2	Escogencia del material del diafragma del elemento primario	126
4.1.3	Otros criterios de selección de los elementos primarios	129
4.1.3.1	Tipo de Transmisor	129
4.1.3.2	Encapsulado	130
4.1.3.3	Empaques	130
4.1.3.4	Límite de sobre presión	131
4.1.3.5	Límite de temperatura	132
4.1.3.6	Precisión	133
4.1.3.7	Fuente de alimentación	133
4.1.3.8	Seguridad	133
4.1.4	Sellos remotos	135
4.1.5	Elementos primarios con diafragmas especiales	140
4.1.6	Aplicaciones para transmisores de presión multivariable	145
4.2	Elementos primarios para la medición de flujo por presión diferencial	145
4.2.1	Elementos primarios para la medición de flujo de gases	146
4.2.1.1	Aplicaciones para la medición de flujo de vapor de agua	147
4.2.1.2	Aplicaciones para la medición de flujo de gases ideales	147
4.2.2	Elementos primarios para la medición de flujo de líquidos	148
4.2.3	Aplicaciones especiales para compensación por presión y temperatura	149
4.2.4	Elementos primarios para la medición de flujo en aplicaciones sanitarias	151

4.3	Elementos primarios para la medición de nivel por presión	151
4.3.1	Aplicaciones de los elementos primarios con sellos remotos y extendidos	152
4.3.2	Elementos primarios para aplicaciones sanitarias	153
4.3.3	Escogencia del elemento primario para tanques abiertos y cerrados	156
4.3.4	Importancia de la medición compensada	160
<b>5</b>	<b>CALIBRACIÓN Y AJUSTE DE LOS TRANSMISORES DE PRESIÓN</b>	
5.1	Utilidad de la trazabilidad	162
5.2	Método de calibración por comparación directa	162
5.2.1	Definiciones	162
5.2.2	Método y sistema de medición	163
5.2.2.1	Método de medición	164
5.2.2.2	Procedimiento de medición	164
5.2.2.3	Equipos e instrumentos para la calibración	166
5.3	Errores detectados en los instrumentos durante la calibración	167
5.4	Ajuste del transmisor de presión después de la calibración	169
5.4.1	Ajuste del cero	169
5.4.2	Ajuste de multiplicación	170
	<b>CONCLUSIONES</b>	173
	<b>RECOMENDACIONES</b>	177
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	179



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Definiciones de los Instrumentos	2
2. Instrumentos ciegos	16
3. Instrumentos Indicadores	17
4. Instrumentos Registradores	17
5. Elementos Primarios	18
6. Transmisores	19
7. Convertidores	20
8. Controladores	21
9. Elemento final de Control	22
10. Clases de Instrumentos	23
11. Transmisor electrónico de equilibrio de fuerzas	29
12. Transmisores Digital Capacitivo	31
13. Puente Wheatstone en silicio difundido	32
14. Transmisor con microprocesador y comunicador	36
15. Transmisor inteligente de temperatura	36
16. Protocolo HART	40
17. Arquitectura actual y futura de fieldbus	42
18. Clases de presión	46
19. Instrumentos de presión y campos de aplicación	47
20. Tipos de sellos	50

21. Transmisor electrónico de equilibrio de fuerzas	52
22. Transductor resistivo	55
23. Transductor de inductancia variable	56
24. Transductor de reluctancia variable	58
25. Transductor capacitivo	59
26. Galga cementada	60
27. Galga sin cementar	60
28. Puente de Wheatstone para galga extensiométrica	61
29. Transductor de presión de silicio difundido	62
30. Transductor piezoeléctrico	64
31. Transductor térmico de termopar	66
32. Transductor Pirani	67
33. Transductor bimetálico	67
34. Transductor de filamento caliente	68
35. Transductor de cátodo frío	69
36. Medidores de presión diferencial para flujo	71
37. Presión diferencial creada por la palca de orificio	72
38. Teorema de Bernoulli	73
39. Coeficientes de compresibilidad	78
40. Factor de corrección de humedad del gas.	82
41. Tramos rectos de tubería para la instalación del elemento	85
42. Recomendaciones ASME para la instalación de elementos de de presión diferencial	86
43. Pérdida de carga de los elementos de presión diferencial	90
44. Disposición de las tomas de presión diferencial	93
45. Placa de orificio	94
46. Orificio de purga	95
47. Sección transversal del elemento <i>WEDGE</i>	96
48. Medidor tipo cono	97

49. Tubo Pitot	99
50. Funcionamiento del tubo Pitot	100
51. Tubo Annubar	101
52. Tobera	103
53. Tubo Venturi	104
54. Transmisores de presión diferencial	106
55. Conexiones entre el elemento y el transmisor de caudal	107
56. Trasmisor de presión multivariable	109
57. Efecto de la temperatura en el volumen de los líquidos	110
58. Efecto de la temperatura y la presión en los gases	111
59. Medidor tipo burbujeo	117
60. Medición de nivel en tanque abierto	119
61. Medición de nivel en tanque cerrado	119
62. Medición de la densidad de un fluido con un solo transmisor	120
63. Medición de la densidad por medio de dos transmisores	122
64. Tipos de sellos y diafragmas	123
65. Detalle del diseño de los sellos remotos	136
66. Transmisor de conexión directa o con tubería	141
67. Transmisores con diafragma de montaje directo	142
68. Transmisores con sellos remotos	143
69. Modo de instalación correcto	144
70. Medición de flujo a través de un ventilador	144
71. Instalación de transmisor con sellos remotos	153
72. Conexión H, <i>Tri-clamp</i> G&H macho o <i>H line</i>	154
73. Conexión I, <i>Cherry-Burrell</i> macho o <i>I line</i>	154
74. Conexión Q, <i>Cherry-Burrell</i> o <i>Q line</i>	155
75. Conexión T, Sello- <i>Bevel</i> o # 14	155
76. Conexión U, Tri-Clamp	155
77. Transmisor de doble puerto	156

78. Definición de rangos para medición nivel tanque abierto	157
79. Definición de rangos para medición nivel tanque cerrado	158
80. Medición nivel por método de pierna húmeda	158
81. Relación de calibración	158
82. Relación medida real-lectura instrumento descalibrado	169

## TABLAS

I. Datos de calibración de manómetro Bourdon	5
II. Datos para cálculo de repetibilidad	11
III. Características de Transmisores	44
IV. Unidades de presión	45
V. Elementos mecánicos	51
VI. Transductores electrónicos de vacío	70
VII. Presión diferencial máxima	84
VIII. Características de los fluidos de relleno	125
IX. Comparativa de elementos para medición de flujo	146
X. Selección del número de puntos de calibración	165

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>A/D</b>	analógico hacia digital
<b>atm</b>	Atmósfera
<b>ca</b>	corriente alterna
<b>cda</b>	columna de agua
<b>cm</b>	Centímetro
<b>cte</b>	Constante
<b>D/A</b>	digital hacia analógico
<b>DCS</b>	Sistema de Control Distribuido
<b>f.e.m.</b>	fuerza electro motriz
<b>f.m.m.</b>	fuerza magneto motriz
<b>FDA</b>	<i>Food and Drug Administration</i> (Administración de drogas y alimentos de Estados Unidos)
<b>F.E.M</b>	Fuerza Electro Motriz
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Agua
<b>Hg</b>	Mercurio
<b>Hz</b>	Hertz
<b>I</b>	Corriente
<b>InWC</b>	pulgadas de columna de agua
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>kPa</b>	Kilo Pascal
<b>lbs</b>	Libras
<b>LCD</b>	Liquid Crystal Display (Indicador de cristal líquido)
<b>m</b>	Metro
<b>mA cc</b>	Mili amperios de corriente continua

<b>min</b>	Minuto
<b>mm</b>	Milímetros
<b>mmWC</b>	milímetros de columna de agua
<b>N</b>	Newton
<b>NEC</b>	<i>National Electrical Code</i> (Código Eléctrico Nacional)
<b>°C</b>	grados centígrados
<b>°F</b>	grados Fahrenheit
<b>P</b>	Presión
<b>PLC</b>	Autómata programable
<b>PP</b>	presión de proceso
<b>psi</b>	<i>pound square inch</i> (libras por pulgada cuadrada)
<b>psia</b>	<i>pound square inch absolute</i> (libras por pulgada cuadrada absolutas)
<b>psig</b>	<i>pound square inch gage</i> (libras por pulgada cuadrada manométricas)
<b>RTD</b>	<i>Resistor Temperatura Detector</i> (Detector resistivo de temperatura)
<b>SAMA</b>	<i>Scientific Apparatus Makers Association</i> (Asociación de fabricantes de aparatos científicos).
<b>S.I.</b>	Sistema Internacional
<b>V cc</b>	Voltios de corriente continua
<b>Ω</b>	ohm (parámetro de resistividad)

## GLOSARIO

<b>Amplificador</b>	Dispositivo electrónico que puede ampliar señales alternas como continuas en un rango de frecuencias definido.
<b>Brida</b>	Reborde circular en el extremo de los tubos metálicos para acoplar unos a otros con tornillos o roblones.
<b>Capilar</b>	Dicho de un tubo: Muy estrecho, como el cabello.
<b>Clorita</b>	Mineral de color verdoso y brillo nacarado, compuesto de un silicato y un aluminato hidratados de magnesia y óxido de hierro.
<b>Ignición</b>	Acción y efecto de iniciarse una combustión.
<b>Monel</b>	Aleación de níquel, cobre y hierro.
<b>Multiplexor</b>	Transmisor simultaneo de funciones como frecuencia, amplitud, etc., sobre un circuito, sin que se pierda su identidad.
<b>Obturador</b>	Dispositivo que sirve para tapar o cerrar una abertura o conducto introduciendo o aplicando un cuerpo.

<b>Protocolo</b>	Señal mediante la cual se reconoce que puede tener lugar la comunicación o la transferencia de información.
<b>Rangeabilidad</b>	Cociente entre el valor de medida superior e inferior de un instrumento.
<b>Termopar</b>	Dispositivo para medir temperaturas, mediante las fuerzas electromotrices originadas por el calor en las soldaduras de dos metales distintos.
<b>Termopozo</b>	Artefacto para la instalación de sensores de temperatura que impide el contacto directo del mismo con el proceso.
<b>Tobera</b>	Abertura tubular, primitivamente de forma cónica, por donde se introduce el aire en un horno o una forja, fragua o crisol.
<b>Transductor</b>	Dispositivo que transforma el efecto de una causa física, como la presión, la temperatura, la dilatación, la humedad, etc., en otro tipo de señal, normalmente eléctrica.
<b>Válvula</b>	Dispositivo que se instala para regular el flujo de un fluido a través de un conducto o abertura.

## RESUMEN

La instrumentación eléctrica en la actualidad en un medio como el nuestro, es un campo que ha tomado mucha importancia dentro de la mayoría de los procesos industriales, primordialmente, en la medición y control para la automatización de dichos procesos, por lo que los instrumentos deben ser de buena repetibilidad, y precisión requerida por cada aplicación, ya que esta se refleja significativamente en el costo del equipo, pero incide notablemente en el producto final.

Los transmisores de presión que existen en el mercado mundial, son tan diversos como las aplicaciones que existen en la industria, pero el correcto desempeño de estos equipos depende de la buena escogencia de los elementos primarios de acuerdo a la aplicación que se pretenda poner en marcha, por lo que el ingeniero debe contar con capacitación y experiencia, aunque conociendo los principios mecánicos y eléctricos de los instrumentos, y algunas aplicaciones sugeridas por fabricantes, un ingeniero puede llegar a ser un buen instrumentista, y hacer buenas elecciones para los equipos en los procesos que requiera dentro de una planta de producción.

Proponer una guía práctica con información básica de las tecnologías de aplicación de los transmisores de presión, proveerá de información introductoria que complementara los conocimientos adquiridos en la Universidad y sentará un precedente para la investigación de algunos de los temas en que se desee profundizar.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Proponer un documento escrito basado en la experiencia de la industria nacional que ayude a formar los criterios básicos en cualquier persona que se inicia en el campo de la instrumentación para la escogencia de elementos primarios en las aplicaciones de los transmisores de presión.

### **Específicos**

1. Describir los principios y leyes en que se fundamenta el funcionamiento de los transmisores de presión.
2. Identificar y evaluar los transmisores de presión disponibles en el mercado, sus aplicaciones y sus limitantes.
3. Proponer soluciones y aplicaciones prácticas para la medición de presión, flujo y nivel, a través de transmisores de presión adecuados a cada requerimiento.
4. Promover el estudio de la instrumentación industrial, principalmente en su forma práctica y de aplicación.



## INTRODUCCIÓN

En Guatemala existen muchas empresas dedicadas a la automatización de procesos por medio de equipos de instrumentación de última generación, para el control y medición de los tan conocidos parámetros como flujo, nivel, temperatura y presión, de los cuales existe una variedad tan grande y tecnologías tan diversas como las marcas de las empresas que los fabrican, actualmente se emplean estos equipos en casi toda la industria del país, específicamente toda aquella que ha implementado la automatización en sus diversos procesos.

Hace ya algunas décadas que la utilización de estos equipos se ha hecho popular, y actualmente la precisión de estos ha mejorado notablemente, al igual que las formas de comunicación, pero en este caso en especial centramos nuestra atención a los diferentes transmisores de presión, de los cuales se manejan de tipo diferencial, de presión absoluta y de presión manométrica. Con estos tres tipos de transmisores se pueden hacer mediciones obviamente de presión en primer lugar, pero dependiendo del elemento primario y ciertas técnicas se puede obtener beneficios adicionales de los equipos como la medición de nivel y flujo.

La propuesta de este trabajo de graduación converge concisamente en dar a conocer los tipos de transmisores de presión sus diferentes tecnologías y limitaciones en la medición de los parámetros, convirtiéndose en una guía introductoria para entender el funcionamiento en cada una de las aplicaciones.

# 1. TRANSMISORES DE PRESIÓN

## 1.1 Definiciones

Los instrumentos de control empleados en la industria de proceso tales como química, petroquímica, alimenticia, metalúrgica, energética, textil, papel, etc., tiene su propia terminología; los términos empleados definen las características propias de medida y de control así como las estáticas y dinámicas de los diversos instrumentos utilizados.

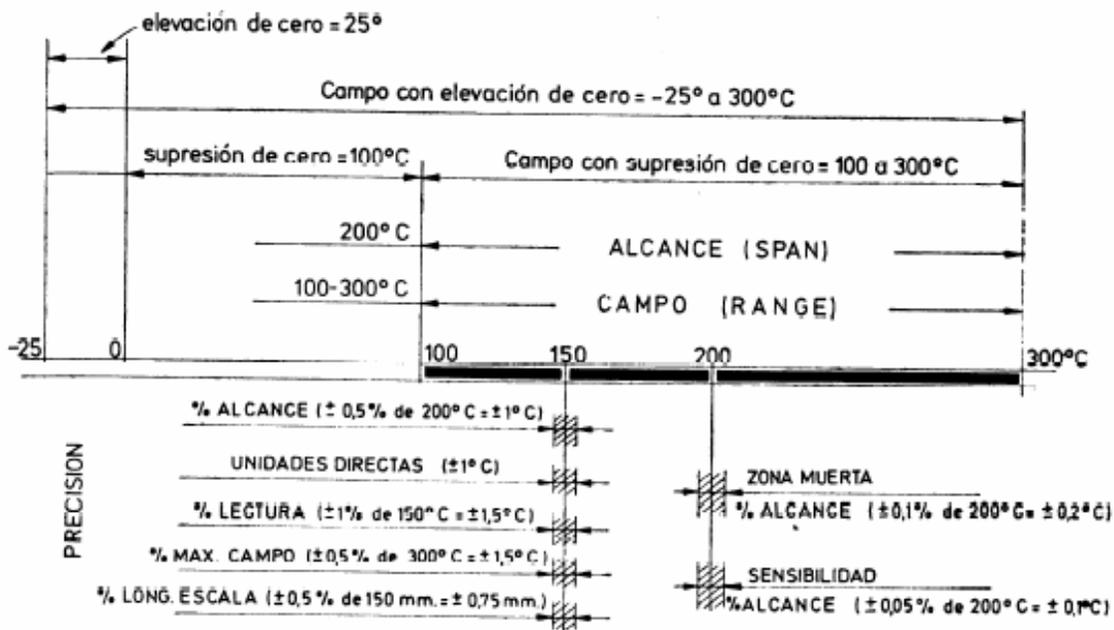
La terminología empleada se ha unificado con el fin de que los fabricantes, los usuarios y los organismos o entidades que intervienen directa o indirectamente en el campo de la instrumentación industrial empleen el mismo lenguaje. Las definiciones de los términos empleados se relacionan con las normas hechas por la SAMA (*Scientific Apparatus Makers Association*) específicamente la PMC 20-2-1970. Se representan en la figura 1 y son las siguientes (figura entre paréntesis los términos ingleses equivalentes).

### 1.1.1 Campo de Medida

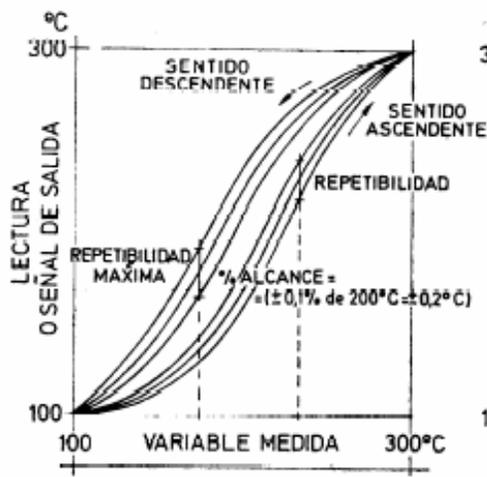
Conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida o de transmisión del instrumento; viene expresado estableciendo los dos valores extremos. Por ejemplo: el campo de medida del instrumento de temperatura de la figura 1 es de 100 - 300° C.

Otro término derivado es el de *dinámica de media o rangeabilidad (rangeability)*, que es el cociente entre el valor de medida superior e inferior de un instrumento. En el ejemplo anterior sería de  $300/100 = 3$ .

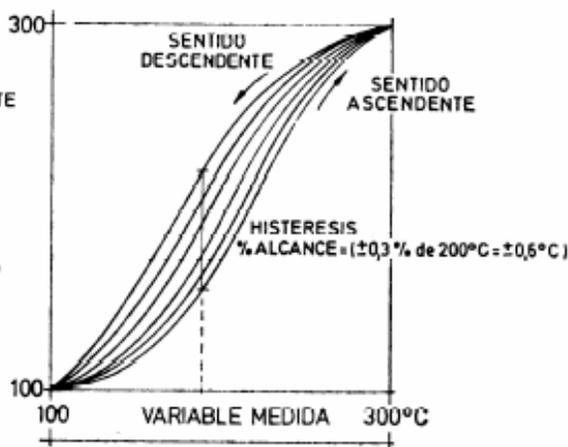
Figura 1 Definiciones de los instrumentos



a - Campo, alcance, precisión, zona muerta, sensibilidad



b - Repetibilidad



c - Histéresis

Fuente: Antonio Creus. Instrumentación Industrial Pág. 4

### 1.1.2 Alcance

Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento. En el instrumento de temperatura de la figura 1, este valor es de 200° C, como puede observarse.

### 1.1.3 Error

Es la diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida . Si el proceso está en condiciones de régimen permanente existe el llamado error estático. En condiciones dinámicas el error varía considerablemente debido a que los instrumentos tienen características comunes a los sistemas físicos: absorben energía del proceso y esta transferencia requiere cierto tiempo para ser transmitida, lo cual da lugar a retardos en la lectura del aparato. Siempre que las condiciones sean dinámicas, existirá en mayor o menor grado el llamado *error dinámico* (diferencia entre el valor instantáneo de la variable y el indicado por el instrumento): su valor depende del tipo de fluido del proceso, de su velocidad, del elemento primario (termopar, bulbo y capilar), de los medios de protección (termopozo), etc. El *error medio* del instrumento es la media aritmética de los errores en cada punto de la media determinados para todos los valores crecientes y decrecientes de la variable medida.

Cuando una medición se realiza con la participación de varios instrumentos, colocados unos a continuación de otros, el valor final de la medición estará constituido por los errores inherentes a cada uno de los instrumentos.

Si el límite del error relativo de cada instrumento es  $\pm a$ ,  $\pm b$ ,  $\pm c$ ,  $\pm d$ , etc., el máximo error posible en la medición será la suma de los valores anteriores, es decir

$$\pm (a + b + c + d + \dots)$$

Ahora bien, como es improbable que todos los instrumentos tengan al mismo tiempo su error máximo en todas las circunstancias de la medida, suele tomarse como error total de una medición la raíz cuadrada de la suma algebraica de los cuadrados de los errores máximos de los instrumentos, es decir, la expresión:

$$\pm \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \dots}$$

Por ejemplo, el error obtenido al medir un caudal con un diafragma, un transmisor electrónico de 4-20 mA c-c-. Un receptor y un integrador electrónico es de:

Error del diafragma .....	2 %
Error del transmisor electrónico de 4-20mA c.c .....	0.5%
Error del receptor electrónico.....	0.5%
Error del integrado electrónico .....	0.5%
Error total de la medición = $\pm \sqrt{2^2 + 0.5^2 + 0.5^2 + 0.5^2}$ =	2.18%

#### 1.1.4 Incertidumbre en la medición

Los errores que existen necesariamente al realizar la medida de una magnitud, hacen que se tenga una incertidumbre sobre el verdadero valor de la medida. La incertidumbre es la dispersión de los valores que pueden ser

atribuidos razonablemente al verdadero valor de la magnitud medida. En el cálculo de la incertidumbre intervienen la distribución estadística de los resultados de series de mediciones, las características de los equipos (deriva, ...), etc.

Cuando se dispone de una sola medida, la incertidumbre es:

$$i = K\sigma$$

Donde: K = factor que depende del nivel de confianza (k = 2 para 95 %)

$\sigma$  = desviación típica del instrumento indicada por el fabricante

Veamos, por ejemplo, el caso de un manómetro tipo Bourdon de 120 kPa (1,2 bar o 1.18 kg/cm<sup>2</sup>) que se calibra con un patrón (comprobador de manómetros de peso muerto) de incertidumbre  $2 \times 10^{-4}$ , efectuándose la calibración a la temperatura de  $20 \pm 2^\circ \text{C}$ , y con ciclos de presiones aplicadas de subida y de bajada, que permiten comprobar si el instrumento tiene histéresis.

Tabla I **Datos de calibración de manómetro Bourdon**

<i>Patrón</i> (kPa)	<i>Manómetro</i> Valor medio 4 medidas sin histéresis	<i>Corrección</i> (kPa)	<i>% Escala</i> (kPa)
20	20.10	-0.10	0.08
40	40.20	-0.20	0.17
60	59.85	+0.15	0.13
80	79.95	+0.05	0.04
95	95.15	-0.15	0.13

Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 6

La incertidumbre debida al patrón en el fondo de escala es:

$$2 \times 10^{-4} \times 120 \text{ kPa} = 0.024 \text{ kPa}$$

y su desviación típica, basada en las distribuciones normal y de Student, con un nivel de confianza del 95 %, es de:

$$\sigma_p = 0,024/2 = 0,012$$

La desviación típica del patrón (variación de presión del patrón con la temperatura =  $21,6 \times 10^{-6}$ ), debida a las condiciones ambientales es:

$$\sigma_{\text{temp}} = (1/3) \times 21,6 \times 10^{-6} \times 2 \times 120 = 0,002 \text{ kPa}$$

La desviación típica de las medidas es la máxima obtenida:

$$\sigma_{\text{max}} = 0,095 \times 1,7 = 0,162$$

siendo 1,7 el factor multiplicador para cuatro medidas (subestimación de la incertidumbre que para diez medidas valdría la unidad)

$$\sigma_{\text{media}} = 0,162/2 = 0,081 \text{ kPa}$$

La variancia experimental es:

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{0.012^2 + 0.002^2 + 0.081^2} = 0.082 \text{ kPa}$$

y la incertidumbre

$$\mu = \frac{2 \times 0.082}{120} \times 100 = 0.13\% \text{ fondo escala}$$

### 1.1.5 Exactitud

Es la cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida.

### 1.1.6 Precisión

La precisión es la tolerancia de medida o de transmisión del instrumento (intervalo donde es admisible que se sitúe la magnitud de la medida), y define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio durante un período de tiempo determinado (normalmente 1 año). Hay varias formas para expresar la precisión:

- a) Tanto por cierto del alcance. Ejemplo: en el instrumento de la figura 1, para una lectura de 150° C y una precisión de  $\pm 0,5 \%$  el valor real de la temperatura estará comprendido entre  $150 \pm 0,5 \times 200/100 = 150 \pm 1$ , es decir, entre 149 y 151° C;
- b) Directamente, en unidades de la variable medida. Ejemplo: Precisión de  $\pm 1^\circ \text{ C}$ ;
- c) Tanto por cierto de la lectura efectuada. Ejemplo: Precisión de  $\pm 1 \%$  de 150° C, es decir,  $\pm 1,5^\circ \text{ C}$ ;
- d) Tanto por ciento del valor máximo del campo de medida. Ejemplo: Precisión de  $\pm 0,5 \%$  de 300° C =  $\pm 1,5^\circ \text{ C}$ ;
- e) Tanto por cierto de la longitud de la escala. Ejemplo: si la longitud de la escala del instrumento de la figura 1.3 es de 150 mm, la precisión de  $\pm 0,5 \%$  representará  $\pm 0,75 \text{ mm}$  en la escala.

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

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

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

Un ejemplo ilustrativo de la diferencia entre exactitud y precisión es el siguiente:

Un manómetro de escala 0-10 bar repita la medida de 5 bar muchas veces en las mismas condiciones, dará diferentes lecturas alrededor de 5 bar, que estarán distribuidas según una curva de campana (curva de Gauss). El manómetro será tanto más exacto cuando más próximo esté el valor medio de las medidas al valor verdadero de 5 bar y será mas preciso cuanto menos sea la dispersión de las medidas. Por lo tanto, los instrumentos de medida estarán diseñados por los fabricantes para que sean precisos, y como periódicamente se descalibran, deben reajustarse para que sean exactos.

### **1.1.7 Zona muerta**

Es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento, es decir, que no produce su respuesta. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida. Por ejemplo: en el instrumento de la figura 1.3 es de  $\pm 0,1 \%$ , es decir, de  $0.1 \times 200/100 = 0.2^\circ \text{ C}$ .

### **1.1.8 Sensibilidad**

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

$$\frac{(12.3 - 11.9)/(20 - 4)}{(5.5 - 5)/10} = \pm 0.5 \text{mA c.c./ bar}$$

Viene dada en tanto por cierto del alcance de la medida. Si la sensibilidad del instrumento de temperatura de la figura 1 es de  $\pm 0,05 \%$ , su valor será de  $0,05 \times 200/100 = \pm 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ .

Hay que señalar que no debe confundirse la sensibilidad con el término de zona muerta: son definiciones básicamente distintas que antes era fácil confundir cuando la definición inicial de la sensibilidad era «valor mínimo en que se ha de modificar la variable para apreciar un cambio medible en el índice o en la pluma de registro del instrumento»

### **1.1.9 Repetibilidad**

La Repetibilidad es la capacidad de reproducción de las posiciones de la pluma, del indicador o de la señal de salida, del instrumento al, medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación, recorriendo todo el campo. Se considera en general su valor máximo (Repetibilidad máxima) y se expresa en tanto por ciento del alcance; un valor representativo es el de  $\pm 0.1 \%$ . Nótese que el término Repetibilidad no incluye la histéresis (figura 1 *b*).

Para determinarla, el fabricante comprueba la diferencia entre el valor verdadero de la variable y la indicación o señal de salida del instrumento recorriendo todo el campo y partiendo para cada determinación desde el valor mínimo del campo de medida. De este modo, en el caso de un manómetro puede haber anotado los datos relacionados en la tabla siguiente.

Tabla II **Datos para cálculo de repetibilidad**

Variable	Indicación	Variable	Indicación
Desde 0 a 0.5	0.502	Desde 0 a 5	5.01
Desde 0 a 1	1.006	Desde 0 a 5.5	5.505
Desde 0 a 1.5	1.509	Desde 0 a 6	6.006
Desde 0 a 2	2.008	Desde 0 a 6.5	6.501
Desde 0 a 2.5	2.506	Desde 0 a 7	7.003
Desde 0 a 3	3.007	Desde 0 a 7.5	7.504
Desde 0 a 3.5	3.503	Desde 0 a 8.0	8.009
Desde 0 a 4	4.006	Desde 0 a 8.5	8.508
Desde 0 a 4.5	4.507	Desde 0 a 9	9.008
		Desde 0 a 10	10.005

Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 9

La repetibilidad viene dada por la fórmula  $\sqrt{\frac{\sum(x_i - x)^2}{N}}$  resultando:

$$\sqrt{\frac{0.00785}{19}} = \pm 0.02\%$$

### 1.1.10 Histéresis

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

Se expresa en tanto por ciento del alcance de la medida. Por ejemplo: Si en un termómetro de 0-100 %, para el valor de la variable de 40° C, la aguja

marca 39,9 al subir la temperatura desde 0, e indica 40,1 al bajar la temperatura desde 100 °C, el valor de la histéresis es de:

$$\frac{40.1 - 39.9}{100 - 0} \cdot 100 = \pm 0.2\%$$

En la figura 1c pueden verse las curvas de histéresis que están dibujadas exageradamente para apreciar bien su forma. Hay que señalar que el término zona muerta está incluido dentro de la histéresis.

#### **1.1.11 Otros términos**

Empleados en las especificaciones de los instrumentos son los siguientes:

##### ***Campo de medida con elevación de cero***

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

##### **Campo de medida con supresión de cero**

Es aquel campo de medida en el que el valor cero de la variable o señal medida es menor que el valor inferior del campo.

##### **Elevación de cero**

Es la cantidad con que el valor cero de la variable supera el valor inferior del campo. Puede expresarse en unidades de la variable medida o en % del alcance.

### **Supresión de cero**

Es la cantidad con que el valor inferior del campo supera el valor cero de la variable. Puede expresarse en unidades de la variable medida o en % del alcance.

### **Fiabilidad**

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

### **Resolución**

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

### **Resolución infinita**

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

### **Ruido**

Cualquier perturbación eléctrica o señal accidental no deseadas que modifica la transmisión, indicación o registro de los datos deseados.

### ***Trazabilidad***

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

### ***Linealidad***

La aproximación de una curva de calibración a una línea recta especificada.

### ***Linealidad basada en puntos***

Falta de linealidad expresada en forma de desviación máxima con relación a una línea recta que pasa a través de los puntos dados correspondientes al cero y al 100% de la variable medida.

### ***Estabilidad***

Capacidad de un instrumento para mantener su comportamiento durante su vida útil y de almacenamiento especificadas.

### ***Temperatura de servicio***

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

### ***Vida útil de servicio***

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

### ***Reproducibilidad***

Capacidad de reproducción de un instrumento de las medidas repetitivas de la lectura o señal de salida para el mismo valor de la variable medida alcanzado en ambos sentidos, en las mismas condiciones de servicio y a lo largo de un período de tiempo determinado. Por ejemplo, un valor representativo sería  $\pm 0.2$  % del alcance de la lectura o señal de salida a lo largo de un período de 30 días.

### ***Respuesta frecuencia***

Es la variación del cociente de las amplitudes de la señal de salida dentro de la variable medida debida a la frecuencia de oscilación de una onda senoidal aplicada a un instrumento, dentro de un campo establecido de frecuencias de la variable medida. Se especifica usualmente como «dentro de  $\pm \dots\%$  ... a ... Hz».

## **1.2 Clases de instrumentos**

Los instrumentos de medición y de control son relativamente complejos y su función puede comprenderse bien si están incluidos dentro de una clasificación adecuada.

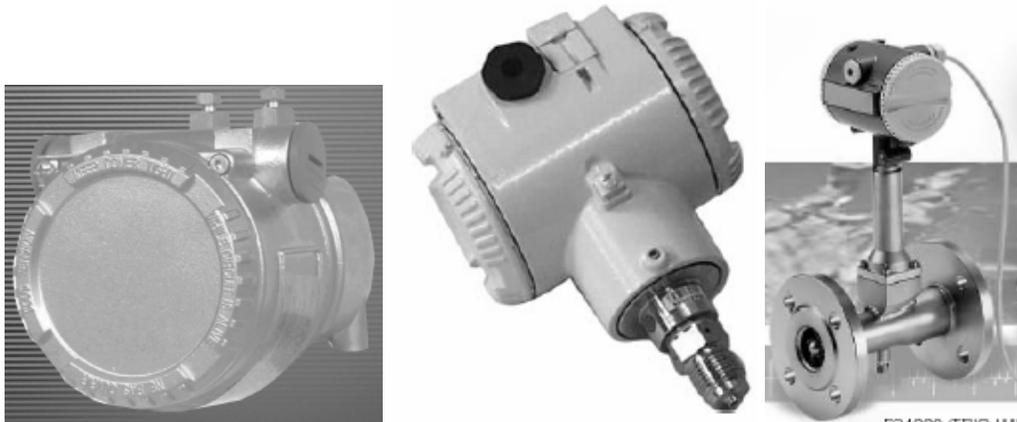
Como es lógico, pueden existir varias formas para clasificar los instrumentos, cada una de ellas con sus propias ventajas y limitaciones, Se considerarán dos clarificaciones básicas: la primera relacionada con la función del instrumento y la segunda con la variable del proceso.

### 1.2.1 En función del instrumento

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

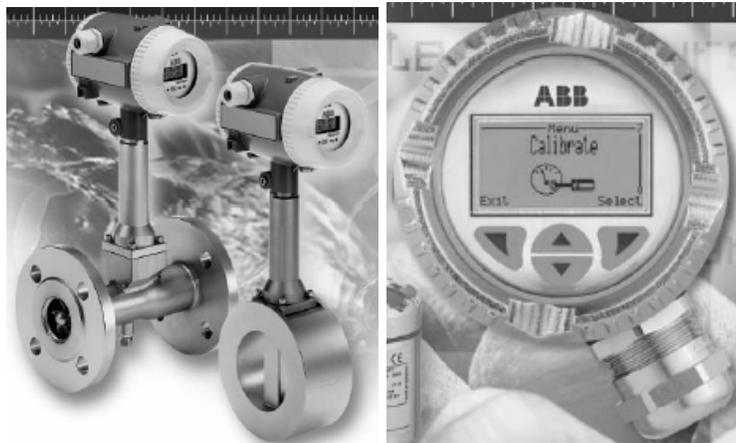
Instrumentos *ciegos* (figura 2), son aquellos que no tienen indicación visible de la variable. Hay que hacer notar que son ciegos los instrumentos de alarma, tales como presostatos y termostatos (interruptores de presión y temperatura respectivamente) que poseen una escala exterior con un índice de selección de la variable, ya que sólo ajustan el punto de disparo del interruptor o conmutador al cruzar la variable el valor seleccionado. Son también instrumentos ciegos, los transmisores de caudal, presión, nivel y temperatura sin indicación.

Figura 2 **Instrumentos Ciegos**



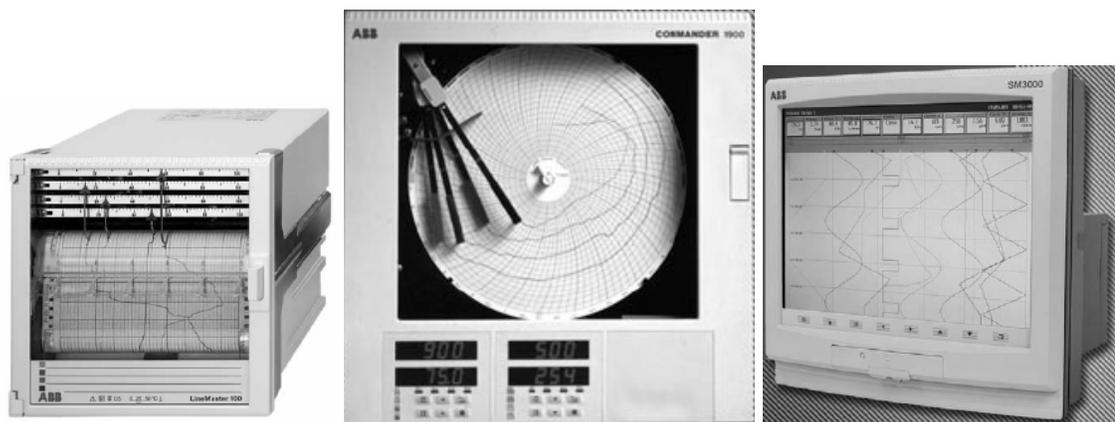
Los instrumentos *indicadores* (figura 3) disponen de un indicador y de la una escala graduada en la que puede leerse el valor de la variable. Según la amplitud de la escala se dividen en indicadores concéntricos y excéntricos. Existen también indicadores digitales que muestran la variable en forma numérica con dígitos.

Figura 3 Instrumentos Indicadores



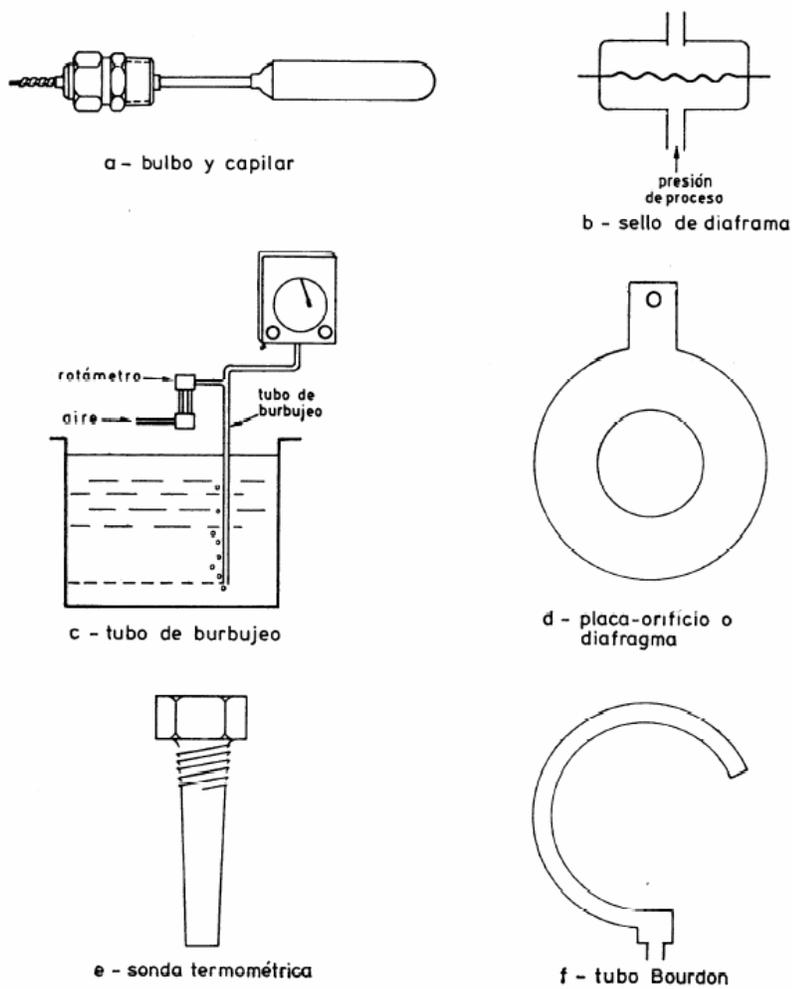
Los instrumentos *registradores* (figura 4) registran con trazo continuo o a puntos la variable, y pueden ser circulares o de gráfico rectangulares o alargado según sea la forma del gráfico.

Figura 4 Instrumentos Registradores



Los elementos primarios (figura 5) están en contacto con la variable 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. El efecto producido por el elemento primario puede ser un cambio de presión, fuerza, posición, medida eléctrica, etc. Por ejemplo: en los elementos primarios de temperatura de bulbo y capilar, el efecto es la variación de presión del fluido que los llena y en los de termopar se presenta un pequeño voltaje debido al efecto *Seebeck*.

Figura 5 Elementos Primarios



Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 16

Los *transmisores* (figura. 6) captan la variable de proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática de margen 3 a 15 psi (libras por pulgada cuadrada) o electrónica de 4 a 20 mA (0 a 20 mA en algunos casos) de corriente continua. También se emplea la señal en unidades métricas 0.2 a 1 bar (0.2 a 1 kg/cm<sup>2</sup>). La señal digital utilizada en algunos transmisores inteligentes es apta directamente para ser utilizada por un computador.

Figura 6 **Transmisores**

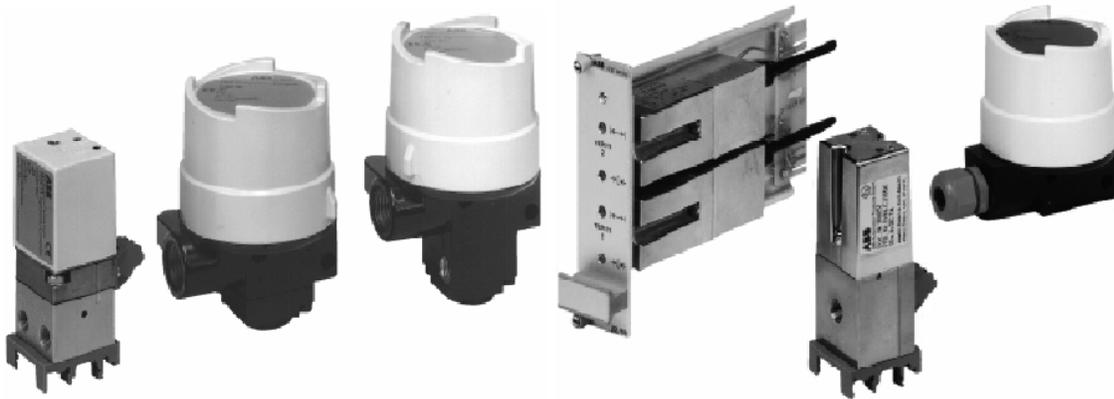


El elemento primario puede formar o no parte integral del transmisor; el primer caso lo constituye un transmisor de temperatura de bulbo y capilar, y el segundo un transmisor de caudal con la placa orificio como elemento primario.

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

Los *convertidores* (figura. 7) son aparatos que reciben una señal de entrada neumática (3-15 psi) o electrónica (4-20mA c.c.) procedente de un instrumento y después de modificarla envían la resultante en forma de señal de salida estándar. Ejemplo: un convertidor **P/I** (señal de entrada neumática a señal de salida electrónica, un convertidor **I/P** (señal de entrada eléctrica a señal de salida neumática).

Figura 7 **Convertidores**



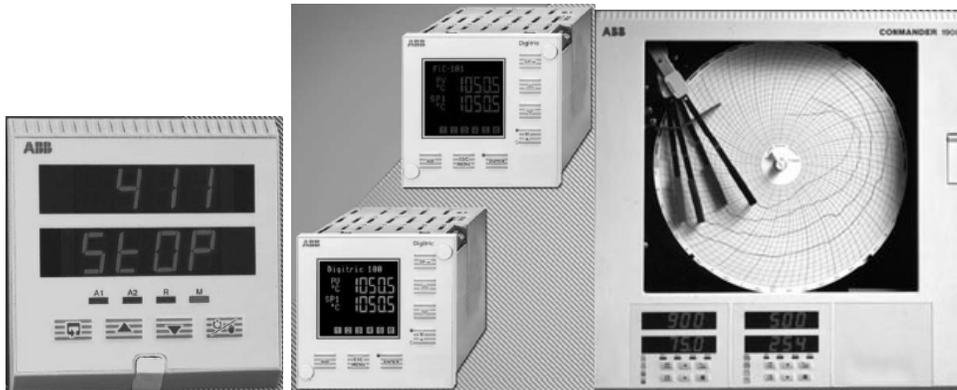
Conviene señalar que a veces se confunde convertidor con transductor. Este último término es general y no debe aplicarse a un aparato que convierta una señal de instrumentos.

Los *receptores* reciben las señales procedentes de los transmisores y las indican o registran. Los receptores controladores envían otra señal de salida normalizada a los valores ya indicados 3 – 15 psi en señal neumática, o 4 – 20 mA c.c., en señal electrónica, que actúan sobre el elemento final de control.

Los *controladores* (figura 8) comparan la variable controlada (presión, nivel, temperatura) con un valor deseado y ejercen una acción correctiva de acuerdo con la desviación.

La variable controlada la pueden recibir directamente, como controladores locales o bien indirectamente en forma de señal neumática, electrónica o digital procedente de un transmisor.

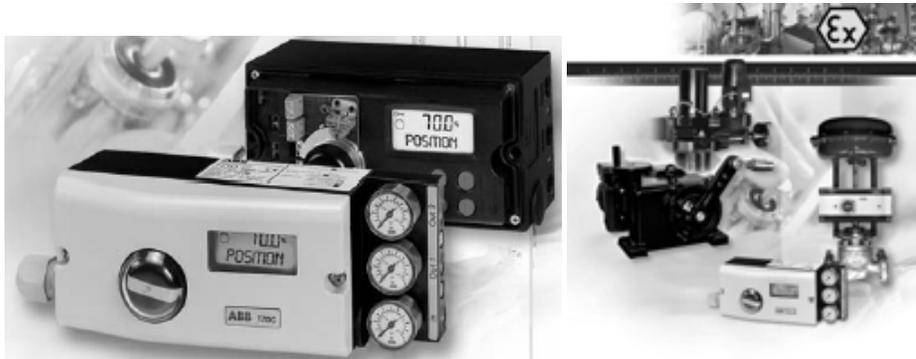
Figura 8 **Controladores**



El *elemento final de control* (figura 9) recibe la señal del controlador y modifica el caudal del fluido o agente de control. En el control neumático, el elemento suele ser una válvula neumática o un servomotor neumático que efectúan su carrera completa de 3 a 15 psi (0.2 – 1 bar). En el control electrónico la válvula o servomotor anteriores son accionados a través de un convertidor de intensidad a presión (I/P) o señal digital a presión que convierte la señal electrónica de 4 – 20 mA c.c., o digital a neumática 3 – 15 psi. En el control eléctrico el elemento suele ser una válvula motorizada que efectúa su carrera completa accionada por un servomotor eléctrico.

Las señales neumáticas (3 – 15 psi o 0.2 – 1 bar o 0.2 – 1 kg/cm<sup>2</sup>) y electrónica (4 – 20 mA c.c.) permiten el intercambio entre instrumentos de la planta. Ocurre así en los instrumentos de señal de salida digital (transmisores, controladores) donde las señales pueden ser manejadas a través de diversos protocolos de comunicación normalizados como *Hart*, *Profibus*, *Modbus* y *Fieldbus Foundation*.

Figura 9 **Elemento final de control**



### 1.2.2 En función de la variable de proceso

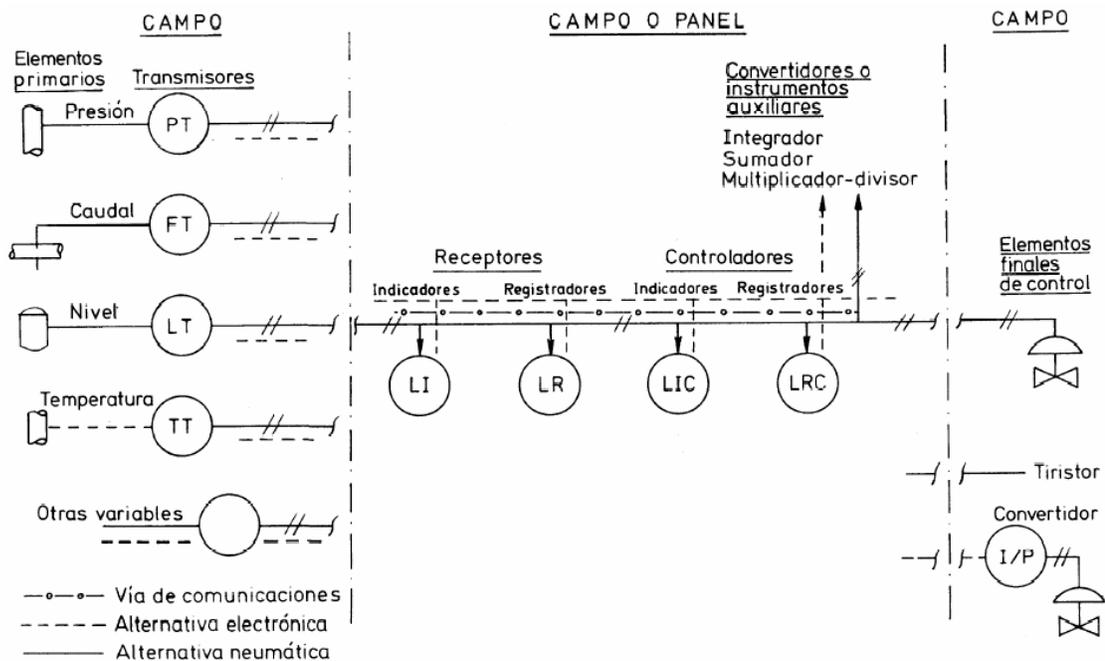
De acuerdo con la variable de proceso, los instrumentos se dividen en instrumentos de caudal, nivel, presión, temperatura, densidad y peso específico, humedad y punto de rocío, viscosidad, posición, velocidad, pH, conductividad, frecuencia, fuerza, turbidez, etc.

Esta clasificación corresponde específicamente, al tipo de las señales medidas siendo independiente del sistema empleado en la conversión de la señal de procesos. De este modo, un transmisor neumático de temperatura del tipo de bulbo y capilar, es un instrumento de temperatura a pesar de que la medida se efectúa convirtiendo las variaciones de presión del fluido que llena el bulbo y el capilar; el aparato receptor de la señal neumática del transmisor anterior es un instrumento de temperatura, si bien, al ser receptor neumático lo podríamos considerar elemento de presión, caudal, nivel o cualquier otra variable, según fuera la señal medida por el transmisor correspondiente; un registrador potenciométrico puede ser un instrumento de temperatura, de conductividad o de velocidad, según sean las señales medidas por los elementos primarios de termopar, electrodos o dínamo.

Asimismo esta clasificación es independiente del número y tipo de transductor existentes entre el elemento primario y el instrumento final. Así ocurre en el caso de un transmisor electrónico de nivel de 4 a 20 mA c.c., un receptor controlador con salida de 4 a 20 mA c.c., un convertidor de intensidad a presión (**I/P**) que transforma la señal de 4 a 20 mA c.c., a neumática de 3 – 15 psi y la válvula neumática de control; todos estos instrumentos se consideran de nivel.

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

Figura 10 **Clases de Instrumentos**



Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 21

En la figura 10 pueden verse los diversos instrumentos descritos.

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

### **1.3 Transmisores**

#### **1.3.1 Generalidades**

Los transmisores son elementos que captan las variables de procesos y las transmiten a distancia a un instrumento receptor indicador, registrador, controlador o una combinación de estos.

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

Nótese que en las válvulas de control pueden emplearse señales neumáticas de 0.6 – 1.4 de 0.4 – 2 o de 0.8 – 2.4 bar, gracias a la función de conversión de la señal de entrada 3 – 15 psi (0.2 – 1 bar) que puede realizar el posicionador acoplado a la válvula o bien mediante resortes especiales dispuestos en el servomotor de la válvula.

Los transmisores electrónicos generan señal estándar de 4 – 20 mA c.c., a distancias de 200 metros a 1 kilómetro, según sea el tipo de instrumento transmisor. Todavía pueden encontrarse transmisores que envían las señales de 1 – 5 mA c.c., 10 – 50 mA c.c., 0.5 mA c.c., 0 - 20 mA c.c., 1 – 5 V c.c., utilizadas anteriormente a la normalización a la señal indicada de 4 – 20 mA c.c.

La señal de 1 – 5 V c.c., es útil cuando existen problemas en el suministro electrónico. De todos modos basta conectar una resistencia de 250  $\Omega$  para tener la señal electrónica de 4 – 20mA c.c.

La señal electrónica de 4 – 20 mA c.c., tiene un nivel suficiente y de compromiso entre la distancia de transmisión y la robustez del equipo.

La relación de 4 – 20 mA c.c., es de 1 – 5, la misma que la razón de 3 – 15 psi en la señal neumática y el nivel mínimo seleccionado de 4 mA elimina el problema de la corriente residual que se presenta al desconectar los circuitos a transistores. La alimentación de los transmisores puede realizarse con una unidad montada en el panel de control y utilizando el mismo par de hilos del transmisor, aunque también existe una variante en cuatro hilos, en la que dos son de alimentación del transmisor y los otros dos corresponden a la transmisión de señal.

El «cero vivo» con que empieza la señal (4 mA c.c.) ofrece las ventajas de poder detectar una avería por corte de un hilo (la señal se anula) y de permitir el diferenciar todavía mas el «ruido» de la transmisión cuando la variable esta en su nivel mas bajo.

Salvo indicación contraria en lo que sigue se supondrá que la señal neumática es de 0.2 – 1 bar (3 – 15 psi), y la electrónica de 4 a 20 mA c.c.

Nótese que el nivel mínimo de la señal neumática de salida no es cero, sino que vale 3 psi (0.2 bar). De este modo se consigue calibrar correctamente el instrumento, comprobar su correcta calibración y detectar fugas de aire en los tubos de enlace con los demás instrumentos neumáticos.

La señal digital consiste en una serie de impulsos en forma de bits. Cada bit consiste en dos signos, el 0 y el 1 (código binario), y representa el paso (1) o no (0) de una señal a través de un conductor. Por ejemplo, dentro de la señal de 4 – 20 mA c.c, los valores binarios de 4, 12 y 20 mA son respectivamente de 00000000, 01111111 y 11111111. Si la señal digital que maneja el microprocesador del transmisor es de 8 bits, entonces puede enviar 8 señales binarias (0 y 1) simultáneamente. Como el mayor número binario de 8 cifras es

$$11111111 = 1 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^3 + \dots + 1 \cdot 2^7 = 255$$

se sigue que la precisión obtenida con el transmisor debida exclusivamente a la señal digital es de:

$$\frac{1}{255} \cdot 100 = \pm 0.4\%$$

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

$$1111111111111111 = 1 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^3 + \dots + 1 \cdot 2^{15} = 65535$$

la precisión obtenida con el transmisor debida exclusivamente a la señal digital es de:

$$\frac{1}{65535} \cdot 100 = \pm 0.00152$$

Las fibras ópticas en la transmisión se están utilizando en lugares de la planta donde las condiciones son críticas (campos magnéticos intensos que influyen sobre la señal...). Los módulos de transmisión pueden ser excitados por fuentes de luz de LED (*Light Emitting Diodes*) o diodos láser. Los módulos receptores disponen de foto detector y preamplificador, con los cables o multicables de fibra óptica y convertidores electroópticos. La transmisión de datos puede efectuarse con multiplexores transmitiendo simultáneamente a la velocidad máxima definida para el tipo de comunicación en serie RS-232 de transmisión de datos para módems y multiplexores. Las ventajas de la transmisión por fibra óptica incluyen la inmunidad al ruido eléctrico (interferencias electromagnéticas), el aislamiento eléctrico total, una anchura de banda mayor que la proporcionada por los correspondientes hilos de cobre, es de pequeño tamaño y de poco peso, sus bajas pérdidas de energía, hacen que las comunicaciones sean seguras.

El microprocesador se utiliza en la transmisión por las ventajas que posee de rapidez de cálculo, pequeño tamaño, fiabilidad, precio cada vez mas competitivo y ser apto para realizar cálculos adicionales.

El microprocesador ha permitido, a partir de 1986, la aparición del primer transmisor con señal de salida enteramente digital, lo cual facilita las comunicaciones enteramente digitales entre el transmisor y el controlador o receptor (Protocolo *HART*).

## **1.3.2 Transmisores electrónicos**

### **1.3.2.1 Transmisor electrónico de equilibrio de fuerzas**

Los transmisores electrónicos son generalmente de equilibrio de fuerzas (figura 11). Consisten en su forma más sencilla en una barra rígida apoyada en un punto sobre la que actúan dos fuerzas en equilibrio:

- La fuerza ejercida por el elemento mecánico de medición (tubo Bourdon, espiral, fuelle...)
- La fuerza electromagnética de una unidad magnética.

El desequilibrio entre estas dos fuerzas da lugar a una variación de posición relativa de la barra, excitando un transductor de desplazamiento tal como un detector de inductancia o un transformador diferencial. Un circuito oscilador asociado con cualquiera de estos detectores alimenta una unidad magnética y la fuerza generada reposiciona la barra de equilibrio de fuerzas. Se completa así un circuito de realimentación variando a corriente de salida en forma proporcional al intervalo de la variable del proceso.

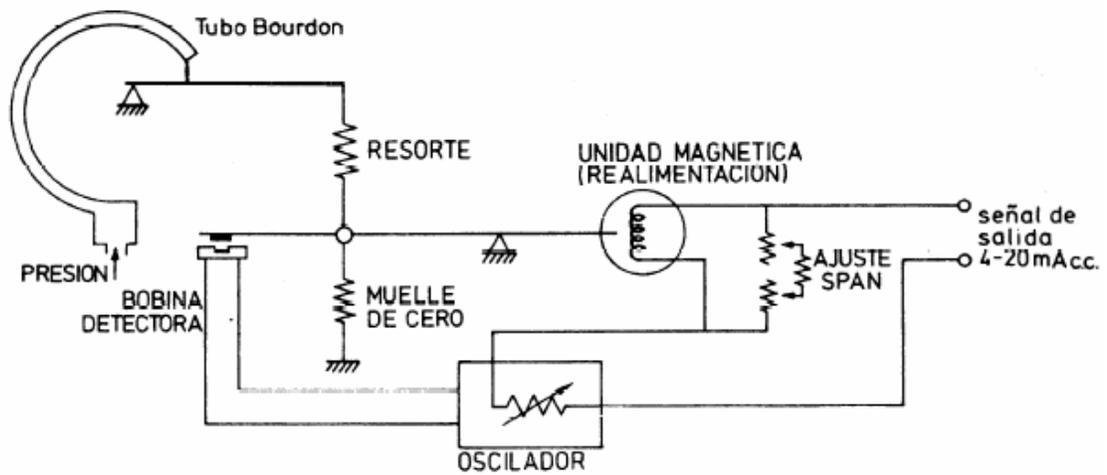
Estos instrumentos, debido a su constitución mecánica, presentan un ajuste del cero y del alcance complicado y una alta sensibilidad a vibraciones. Su precisión es del orden del 0.5-1%.

#### **1.3.2.1.1 Detector de posición de Inductancia**

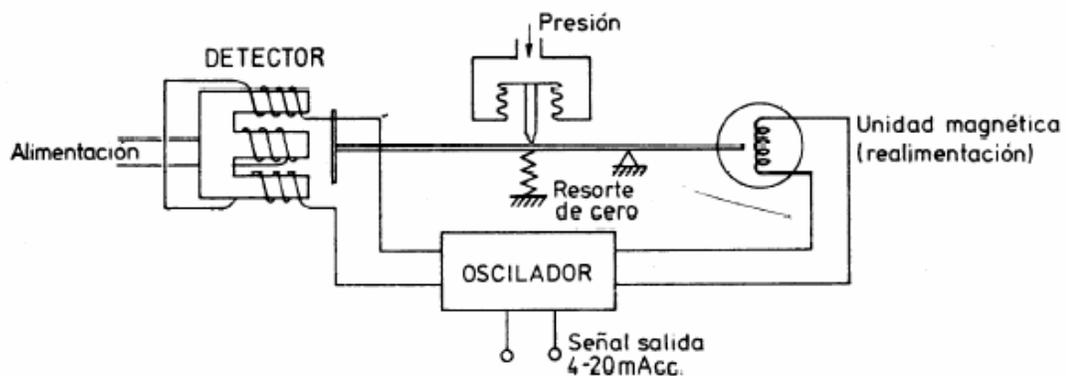
El detector de posición de inductancia está formado por dos piezas de ferrita, una en la barra y la otra fijada rígidamente en el chasis del transmisor y contiene una bobina conectada a un circuito oscilador.

Cuando aumenta o disminuye el entrehierro disminuye o aumenta respectivamente la inductancia de la bobina detectora modulando la señal de salida del oscilador. En la figura 11 a puede verse un diagrama de este tipo de instrumento.

Figura 11 Transmisor electrónico de equilibrio de fuerzas



a - detector de posición de inductancia



b - transformador diferencial

Fuente: Antonio Creus. Instrumentación Industrial Pág. 59

### **1.3.2.1.2 Transformador Diferencial**

El transformador diferencial (figura 11 *b*) (LVDT-Linear Variable Differential Transformer) consiste en un núcleo magnético con tres o más polos bobinados. El bobinado central está conectado a una línea de alimentación estabilizada y se denomina arrollamiento primario. Los otros dos están bobinados idénticamente con el mismo número de espiras y en la misma disposición. El transformador se cierra magnéticamente con la barra de equilibrio de fuerzas. Al variar la presión cambia la posición de la barra induciendo tensiones distintas en las dos bobinas, mayor en la bobina arrollada en el polo con menor entrehierro y menor en la opuesta.

Las bobinas están conectadas en oposición y la señal de tensión diferencial producida es introducida en un amplificador transistorizado que alimenta la unidad magnética de reposición de la barra.

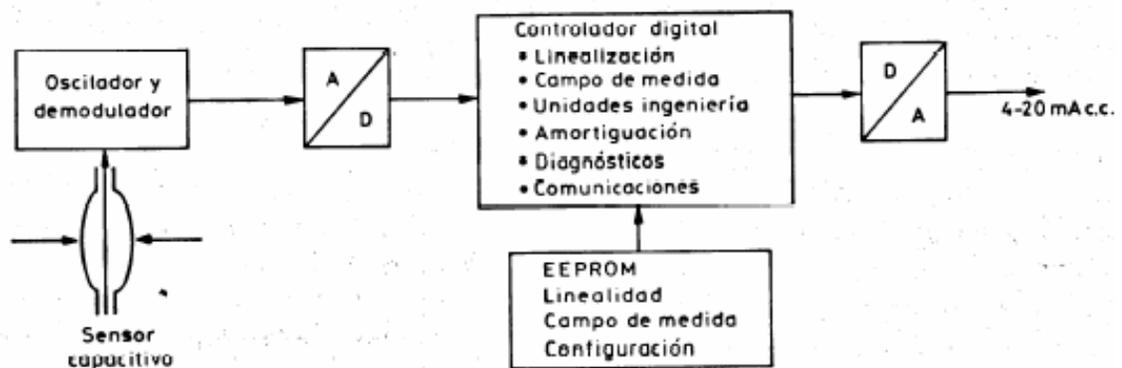
### **1.3.2.2 Transmisores Digitales**

Hacia 1983 la firma Honeywell presentó en el mercado el primer transmisor digital denominado «inteligente» (smart transmitter). Este término indica que el sensor incorpora funciones adicionales a las propias de la medida exclusiva de la variable. Dichas funciones son proporcionadas por un microprocesador, lo que no es esencial para que al instrumento pueda aplicársele la denominación de «inteligente». Existen dos modelos básicos de transmisores inteligentes:

El capacitivo (figura 12) está basado en la variación de capacidad que se produce en un condensador formado por dos placas fijas y un diafragma sensible interno y unido a las mismas, cuando se les aplica una presión o presión diferencial a través de dos diafragmas externos.

La transmisión de la presión del proceso se realiza a través de un fluido (aceite) que rellena el interior del condensador. El desplazamiento del diafragma sensible es de sólo 0.1mm como máximo. Un circuito formado por un oscilador y demodulador transforma la variación de capacidad en señal analógica. Ésta a su vez es convertida a digital, y pasa después a un microprocesador «inteligente» que la transforma a la señal analógica de transmisión de 4-20 mA c.c.

Figura 12 **Transmisor digital capacitivo**

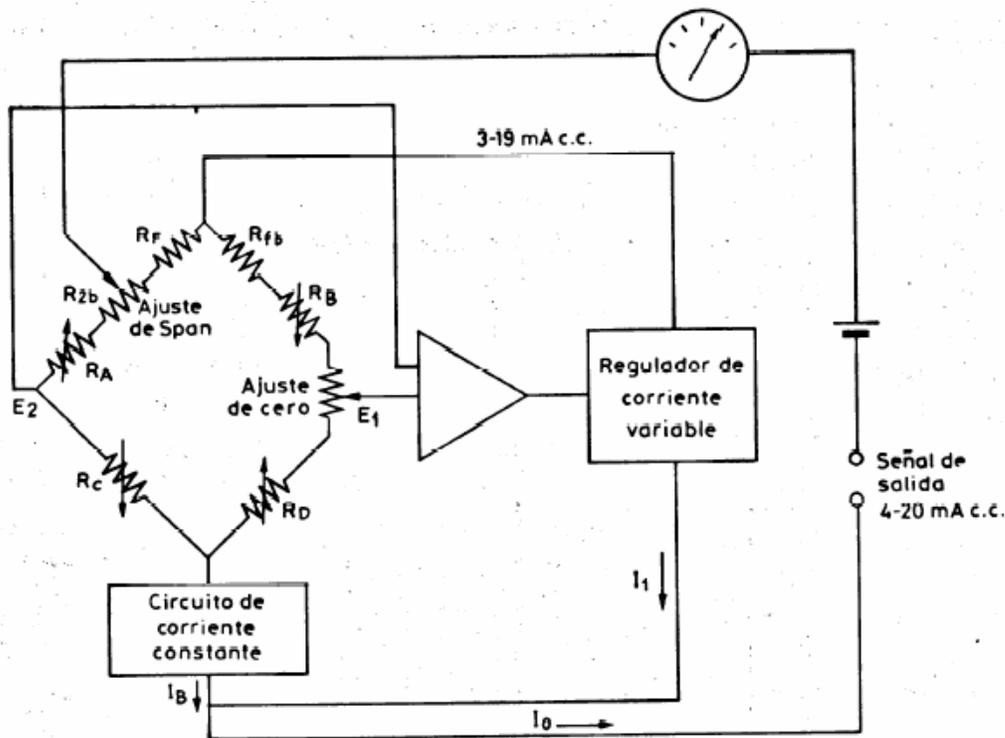


Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pag. 61

El de semiconductor (figura 13) aprovecha las propiedades eléctricas de los semiconductores al ser sometido a tensiones. El modelo de semiconductor difundido está fabricado a partir de una delgada película de silicio y utiliza técnicas de dopaje para generar una zona sensible a los esfuerzos. Se comporta como un circuito dinámico de puente de Wheatstone aplicable a la medida de presión, presión diferencial y nivel, formando por una pastilla de silicio difundido en el que se hallan embebidas las resistencias  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  y  $R_D$  de un puente de Wheatstone. El desequilibrio del puente originado por cambios en la variable, da lugar a una señal de salida de 4-20 mA c.c. Su funcionamiento es el siguiente:

Cuando no hay presión, las tensiones  $E_1$  y  $E_2$  son iguales, y al aplicar la presión del proceso,  $R_B$  y  $R_C$  disminuyen su resistencia y  $R_A$  y  $R_D$  la aumentan, dando lugar a caídas de tensión distintas y a una diferencia entre  $E_1$  y  $E_2$ . Esta diferencia se aplica a un amplificador de alta ganancia que controla un regulador de corriente variable con un margen variable. Un margen de corriente continua de 3 a 19 mA c.c. con 1 mA del puente produce una señal de salida de 4 a 20 mA c.c. Esta corriente circula a través de la resistencia de realimentación  $R_{fb}$ , y eleva  $E_1$  a una tensión equivalente a  $E_2$  y reequilibra el puente. Como la caída de tensión producida a través de  $R_{fb}$  es proporcional a  $R_{2b}$ , esta resistencia fija el intervalo de medida (span) del transductor. El cero del instrumento se varía intercalando resistencias fijas en el brazo izquierdo del puente (cero basto) y un potenciómetro en el brazo derecho (cero fino).

Figura 13 **Puente Wheatstone en silicio difundido**



Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 61

La pastilla de silicio contiene normalmente dos puentes de Wheatstone, uno de presión, y el otro de presión diferencial y una termorresistencia. El microprocesador compensa las no linealidades de los elementos o sensores individuales, convierte las tres señales analógicas a impulsos y calcula, mediante datos prefijados en fábrica y almacenados en su memoria, un valor digital de salida que es transformado a la señal de salida analógica de 4-20 mA c.c. Un comunicador portátil de teclado alfanumérico que puede conectarse en cualquier punto del cable de dos hilos entre el transmisor y el receptor, permite leer los valores del proceso, configurar el transmisor, cambiar su campo de medida y diagnosticar averías.

El instrumento proporciona un aumento en la precisión de la señal transmitida y en la precisión del lazo de control del orden de 0.15 %, y lo que es mas importante, unas posibilidades de calibración y de cambio del margen de medida, no conocidas hasta entonces. Antes de su aparición, la calibración y el cambio del margen de medida debían realizarse normalmente en el taller de instrumentos, lo que equivalía a disponer de aparatos de repuesto para continuar trabajando con el proceso, siendo inevitable la marcha a ciegas durante el tiempo requerido para el cambio mecánico del instrumento (a no ser, naturalmente, que se dispusiera de un instrumento doble). Por ejemplo, la calibración de un instrumento de nivel típico requiere el vaciado del tanque, el desmontaje del aparato, y su calibración en el taller de instrumentos. Para evitar detener el proceso, es necesario montar una brida ciega en lugar del transmisor, para poder llenar el tanque y mantener la producción.

En variables específicas, tal como el caudal, el transmisor inteligente proporciona una mejora en la relación caudal máximo/caudal mínimo que pasa de 3:1 en la placa-orificio (tobera o tubo Venturi) a 10:1 manteniendo la misma precisión de  $\pm 1$  %.

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

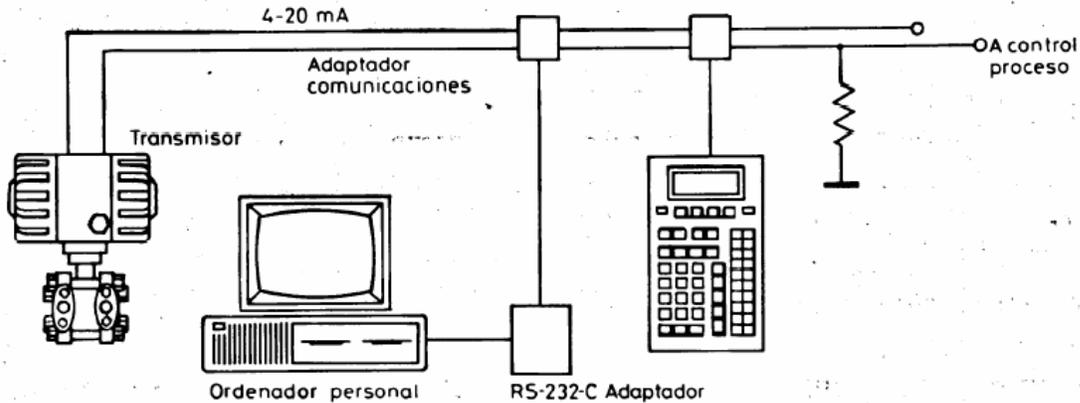
Los transmisores inteligentes se prestan también al autodiagnóstico de sus partes electrónicas internas, función que proporciona al Departamento de Mantenimiento: primero el conocimiento de la existencia de un problema en el circuito, segundo el diagnóstico y la naturaleza del problema señalando qué instrumento ha fallado y tercero, las líneas a seguir para la reparación o sustitución del instrumento averiado.

Con la entrada del transmisor inteligente, la calibración y el cambio de margen de trabajo se logran simplemente por examen de los datos almacenado en una *PROM* y por utilización de técnicas digitales. Se consigue de este modo una relación «*turndown*» (relación entre el nivel mínimo de la variable y el máximo que es medible, conservándose la precisión de la medida del instrumento) cuyo valor máximo es de 400:1, frente a la relación 1 a 6 de un transmisor de presión o nivel convencional, lo que posibilita la reducción drástica del número de transmisores en *stock* al poder utilizar prácticamente un solo modelo para cubrir los diferentes campos de medida utilizados hasta entonces en la fabrica.

La señal de salida continua siendo de 4 a 20 mA c.c., pero, en el año de 1986 Honeywell presento ya el transmisor con señal de salida enteramente digital, lo que proporciona un aumento de la precisión del lazo de control que pasa al  $\pm 0.15\%$ , al eliminar los convertidores A/D (analógico-digital) del transmisor y el D/A (digital-analógico) del receptor (indicador, registrador o controlador). En líneas generales la precisión total del lazo de control utilizando transmisores analógicos convencionales es de  $\pm 0.84\%$ ; empleando transmisores inteligentes con señal de 4 – 20 mA c.c., pasa a  $\pm 0.29\%$ , y usando transmisores inteligentes digitales se logra  $\pm 0.15\%$ . Y si estos últimos incorporan un algoritmo de caracterización, mejoran todavía mas la precisión del lazo llegando a  $\pm 0.075\%$ . Otras ventajas adicionales de estos transmisores son: el cambio automático del campo de medida, en caso de que el valor de la variable salga del campo, las rutinas de autodiagnóstico, la monitorización de temperaturas y tensiones de referencia de los transmisores, la fijación de la variable en el ultimo valor alcanzado, en caso de detectarse alguna irregularidad en el funcionamiento del aparato, el auto ajuste desde el panel de control, la función de caracterización que compensa las diferencias entre las condiciones de calibración en fabrica y las condiciones de campo actuales (algoritmo de caracterización único para cada instrumento) y que permite la instalación directa en campo y la fijación del campo de medida sin calibración, etc. Para visualizar las señal de salida, los datos de configuración, el margen de funcionamiento y otros parámetros, y cambiar los ajustes del campo de medida se utiliza un comunicador portátil, que se conecta en cualquier punto de la línea de transmisión.

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

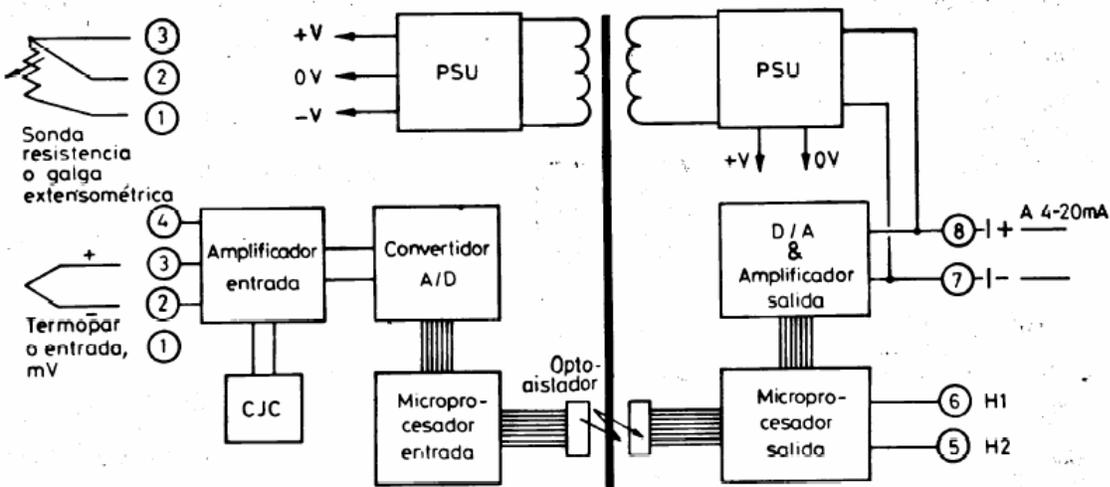
Figura 14 Transmisor con microprocesador y comunicador



Fuente: Antonio Creus. Instrumentación Industrial Pág. 62

La «inteligencia» se aplica también a otras variables, tal como la temperatura, donde el transmisor puede trabajar con distintas sondas de resistencia y termopares así como diversos campos de medida, gracias a la linealización de las escalas y a la compensación de la unión fría que aporta el microprocesador (figura 15).

Figura 15 Transmisor inteligente de temperatura



Fuente: Antonio Creus. Instrumentación Industrial Pág. 62

El transmisor con señal de salida enteramente digital, aumenta la precisión del lazo de control, al eliminar los convertidores A/D (analógico-digital) del transmisor y el D/A (digital-analógico) del receptor (indicador, registrador o controlador).

En resumen las ventajas del transmisor inteligente con relación a los instrumentos electrónicos analógicos convencionales (señal de salida 4 – 20 mA c.c.) son:

- Mejora de la precisión (2:1 como mínimo).
- Mejora de la estabilidad en condiciones de trabajo diversas (3:1 15:1).
- Campos de medida mas amplios.
- Mayor fiabilidad.
- Bajos costos de mantenimiento.

Y si se emplea el transmisor digital inteligente (comunicación digital directa), la ventajas adicionales son:

- Menor desviación por variaciones de temperatura ambiente o de la tensión de alimentación.
- Diagnóstico continuo del circuito (esta del instrumento).
- Comunicación bidireccional.
- Configuración remota desde cualquier punto de la línea de transmisión.

En cuanto a las desventajas, existe el problema de la rapidez y la falta de normalización de las comunicaciones.

Si el transmisor inteligente transmite una señal rápida, tal como la presión o el caudal, existe el peligro de que la cantidad de tarea y cálculos que debe realizar el microprocesador, le impida captar todos los valores de la variable. En este caso, debe utilizarse un transmisor electrónico analógico.

Los transmisores inteligentes con señal de salida de 4 – 20 mA c.c, pueden intercambiarse perfectamente con transmisores de otras marcas. Ello no es posible si son de señal de salida digital, debido a la falta de normalización en el campo de las comunicaciones que subsiste actualmente.

Existen instrumentos que reúnen tres transmisores en un solo aparato, midiendo la presión, la presión diferencial y la temperatura. De este modo permite medir los caudales volumétrico y másico compensados de líquidos y gases a partir de un elemento primario, tal como una placa de orificio, tobera o tubo Venturi, reduciendo el costo (menores cableado, mano de obra y mantenimiento) y aumentando la precisión.

### **1.3.3 Comunicaciones**

La mayor parte de las comunicaciones entre los instrumentos de proceso y el sistema de control se basa en señales analógicas (neumáticas de 0.2 – 1 bar utilizadas en pequeñas plantas y en las válvulas de control y electrónicas de 4 – 20 mA c.c.). Sin embargo, los instrumentos digitales capaces de manejar grandes volúmenes de datos y guardarlos en unidades históricas están aumentando día a día sus aplicaciones. Su precisión es unas diez veces mayor que la de la señal clásica de 4 – 20 mA c.c. En lugar de enviar cada variable por un par de hilos (4 – 20 mA c.c.), transmiten secuencialmente las variables a través de un cable de comunicaciones llamado bus.

La tecnología «*fieldbus*» o «bus de campo» es un protocolo de comunicaciones digital de alta velocidad que está en camino de sustituir a la clásica señal analógica de 4 – 20 mA c.c. en todos los sistemas de control distribuido (DCS), y controladores programables (PLC), instrumentos de medida y transmisión y válvulas de control. La arquitectura «*fieldbus*» conecta estos aparatos con ordenadores que pueden trabajar para muchos niveles en la dirección de la planta. Los protocolos patentados por los fabricantes no permiten al usuario final la intercambiabilidad o la inter-operatibilidad de sus instrumentos, es decir, no es posible sustituir un instrumento de un fabricante por otro similar de otro fabricante, ni intercambiar instrumentos de funcionalidad equivalente.

La arquitectura interna de «*fieldbus*» tiene los siguientes niveles o capas:

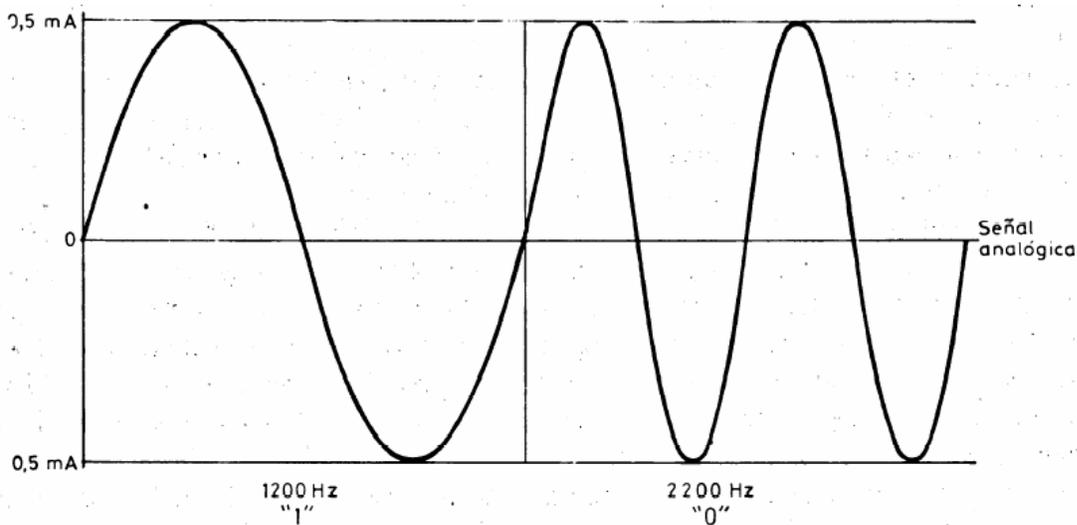
- Nivel 1: Físico que especifica las condiciones del medio de transmisión, las características eléctricas, mecánicas y funcionales y la codificación de datos.
- Nivel 2: Enlace que establece el enlace lógico, el control de flujo y errores, la sincronización de la transmisión y el control de acceso al medio.
- Nivel 3 al 6: Son objeto de protocolo.
- Nivel 7: Aplicaciones que contienen los servicios y regulan la transferencia de mensajes entre las aplicaciones del usuario y los diferentes instrumentos.
- Capa usuario: Dedicada.

El primer bus de campo, efectivamente abierto, utilizado ampliamente fue el *MODBUS DE Gould Modicon* que solo dispone de nivel 1 (físico) y del 2 (enlace).

Los protocolos de comunicación abiertos importantes son el *HART, World FIB, ISP, BITBUS, INTERBUS-S, P-NET, ECHELON* y *CAN*.

El protocolo *HART (High way-Adressable-Remote-Transducer)* desarrollado inicialmente por Rosemount Inc., agrupa la información digital sobre la señal analógica clásica de 4 –20 mA c.c. La señal digital usa dos frecuencias individuales, 1200 y 2200 Hz, que representan los dígitos 1 y 0 (figura 23) y que forman una onda senoidal que se superpone sobre el lazo de corriente de 4 – 20 mA c.c. Como la señal promedio de una onda senoidal es cero, no se añade ninguna componente de c.c. a la señal analógica de 4 –20 mA c.c. En la figura 16 pueden verse las señales que constituyen el protocolo *HART*.

Figura 16 **Protocolo HART**



Fuente: Antonio Creus. *Instrumentación Industrial* Pág. 66

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

*WorldFIP* utiliza sistema de comunicaciones sincronizados en tiempo, basados en el protocolo *FIP (Factory Instrumentation Protocol)* de industria francesa que garantiza una comunicación rápida en el control de procesos. Lo integran *Schneider, Honeywell, Bailey, Cegelc, Allen Bradley*.

*ISP (Interoperable System Project)* se basa en varios sistemas, entre ellos *PROFIBUS*, estándar alemán en que el aparato («*host*») pasa a un testigo («*token*») de aparato en aparato, dándole así acceso al circuito. Lo integran *Siemens, Rosemount, Fisher Controls, Yokogawa, Foxboro, ABB, etc.*

La fundación *Fieldbus (Fielbus Foundation)* fue creada en 1994 para definir un único estándar según las normas IEC-ISA y agrupa la organización *WorldFIP* y la Fundación *ISP*. Ello fue posible gracias a los progresos efectuados en los protocolos *FIP* y *PROFIBUS*.

En Europa existen normas de la *CEGELEC (EN-82150)* y está en marcha una iniciativa europea que puede reunir características de las normas *FIP, PROFIBUS* y *P-NET*.

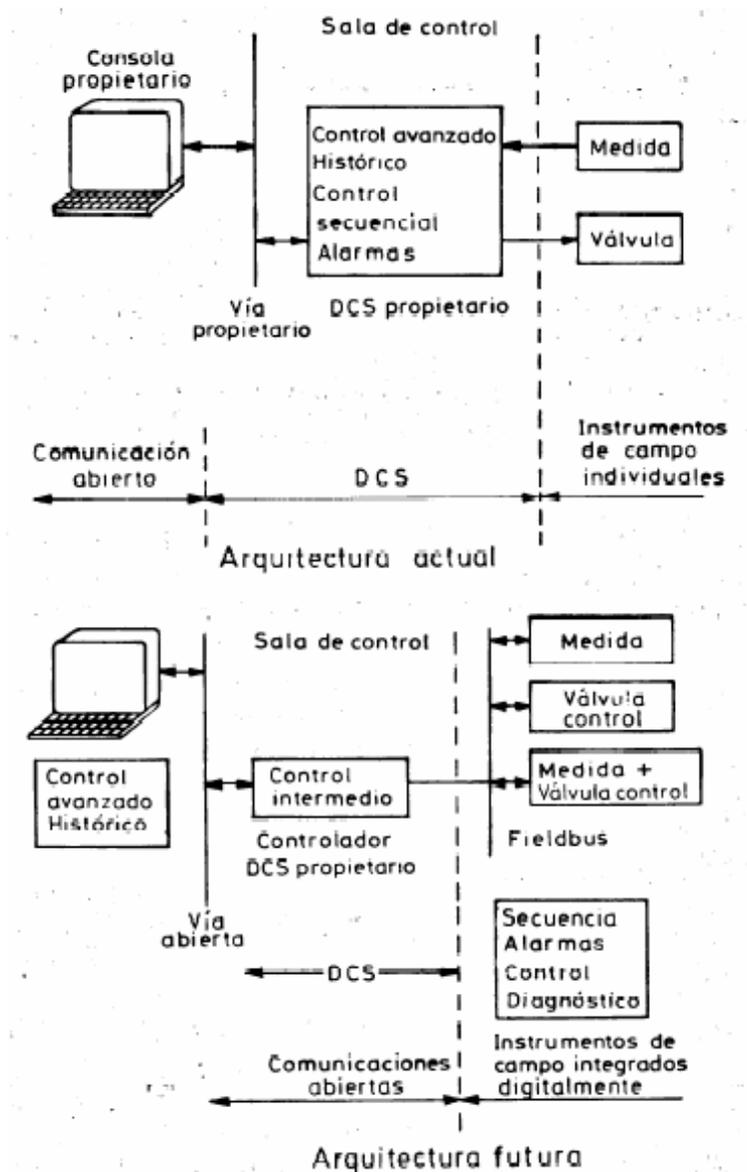
La norma *ISP-SP50*, que inicialmente tenía que terminarse en 1989, se ha retrasado debido a la política de competencia de los fabricantes de instrumentos y todavía no es un estándar universal.

El sistema «totalmente abierto» desde la sala de control hasta los instrumentos de campo se conseguirá con el «*fieldbus*» estándar.

*Fieldbus* proporciona el control automático y secuencial, alarmas, inteligencia en los instrumentos de campo.

En la figura 17 pueden verse las arquitecturas actual y futura de «*fieldbus*».

Figura 17 **Arquitectura actual y futura de fieldbus**



Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 67

Cabe señalar que el sistema totalmente abierto puede combinar con UNÍX, *Ethernet*, con la base de datos relacional Oracle y con Windows, lo que reduce la necesidad de interfases. Asimismo, el sistema abierto combinado con el software comercial puede conducir a una potencial pérdida de seguridad de datos por lo que los suministradores propietarios del sistema lo desarrollan con sumo cuidado.

Actualmente, los fabricantes están investigando continuamente en la evolución de sus equipos, por lo que no están excesivamente interesados en que exista un solo estándar. Por otro lado, al realizar en un tiempo mínimo las máximas aplicaciones, posibles de su «*fieldbus*» propietario, el fabricante puede conseguir una cierta irreversibilidad del mercado, de tal modo que los propios usuarios pueden forzar la normalización del protocolo de comunicaciones que emplean.

Existen también asociaciones, fusiones y alianzas de colaboración entre empresas orientadas a conseguir un segmento importante del mercado. Todo ello contribuye a la desorientación del usuario que antes de tomar una decisión debe ponderar las ventajas de los sistemas de comunicación actuales y las soluciones futuras (comunicaciones con otros tipos de *fieldbus*, etc.).

De todos modos, es deseable que los usuarios puedan disponer de un protocolo estándar y que éste pueda incorporarse lo mas pronto posible a los grandes sistemas de control distribuido. Por otro lado, estos sistema deben usar, de modo transparente, la infraestructura de comunicaciones de datos existente.

### 1.3.4 Comparación de transmisores

En la tabla III se efectúa una comparación de características de los transmisores neumáticos, electrónicos convencionales, e inteligentes; estos últimos en las versiones de señal de salida de 4 – 20 mA c.c., y de señal de salida digital.

Tabla III **Características de Transmisores**

<i>Transmisor</i>	<i>Señal</i>	<i>Precisión</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Neumático	3 a 15 psi 0.2 a 1 bar	± 0.5%	Respuesta Sencillo	Necesita Aire limpio No salvan información Distancias limitadas Mantenimiento caro Sensible a vibraciones
Electrónico convencional	4 a 20 mA c.c.	± 0.5%	Respuesta	Sensible a vibraciones o golpes Sensible a altas temperaturas
Electrónico Inteligente	4 a 20 mA c.c.	± 0.2%	Mayor Precisión Intercambiable Estable, Fiable Campo de media mas amplio Bajo Costo de mantenimiento	Lento (para variables rápidas puede presentar problemas)
Electrónico Inteligente Señal Digital	Digital	± 0.1%	Mayor Precisión Mas Estabilidad Fiable Autodiagnóstico Comunicación bidireccional Configuración remota Campo de Media mas amplio Bajo costo de mantenimiento	Lento (para variables rápidas puede presentar problemas)

Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 68

## 2. MEDICIÓN DE PRESIÓN

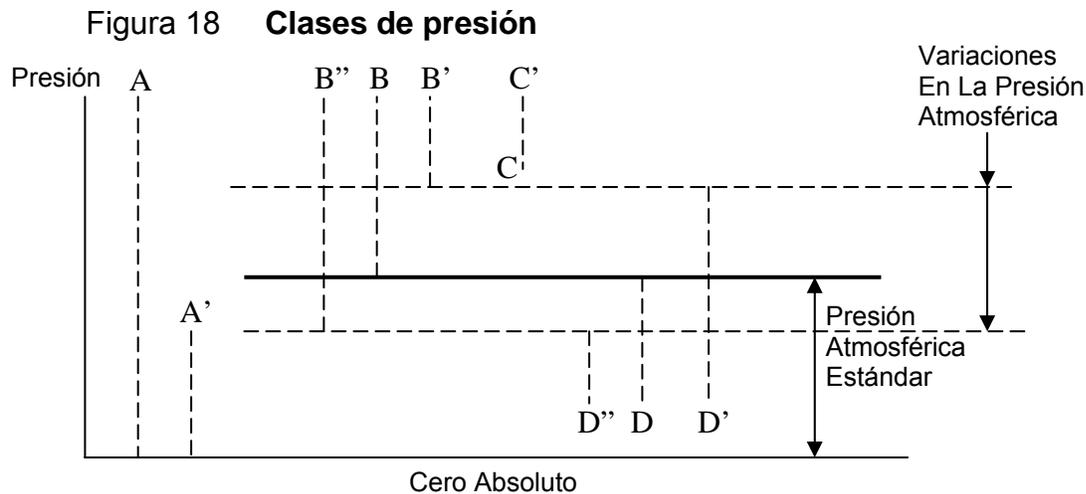
### 2.1. Unidades y clases de presión

La presión es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades tales como pascal, bar, atmósferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi (libras por pulgada cuadrada). En el Sistema Internacional (S.I.) está normalizada en pascal que es 1 newton por metro cuadrado ( $1 \text{ N/m}^2$ ), siendo el newton la fuerza que aplicada a un cuerpo de masa 1 Kg, le comunica una aceleración de  $1 \text{ m/s}^2$ . Como el pascal es una unidad muy pequeña, se emplean también el kilopascal ( $1 \text{ kPa} = 10^{-2} \text{ bar}$ ), el megapascal ( $1 \text{ Mpa} = 10 \text{ bar}$ ) y el gigapascal ( $1 \text{ GPa} = 10,000 \text{ bar}$ ). En la industria se utiliza también el bar ( $1 \text{ bar} = 105 \text{ Pa} = 1.02 \text{ kg/cm}^2$ ). En la tabla 4 figuran las equivalencias entre estas unidades.

Tabla IV Unidades de presión

	Psi.	Pulg. H <sub>2</sub> O	Pulg. Hg	Atmosfer	Kg/cm <sup>2</sup>	Cm de H <sub>2</sub> O	mm de Hg	Bar	Pa
Psi	1	27.68	2.036	0.680	0.0703	70.31	51.72	0.0689	6894.76
Pulgada H <sub>2</sub> O	0.0361	1	0.0735	0.0024	0.0025	2.540	1.868	0.0024	249
Pulgada Hg	0.4912	113.6	1	0.0334	0.0345	34.53	25.4	0.0338	3386.39
Atmósfer	14.7	406.79	29.92	1	1.033	1033	760	1.0132	$1.0133 \times 10^5$
Kg/cm <sup>2</sup>	14.22	393.7	28.96	0.9678	1	1000	735.6	0.98	98066
Cm de H <sub>2</sub> O	0.0142	0.3937	0.0289	0.00096	0.0010	1	0.7355	0.0009	98.06
mm de Hg	0.0193	0.5353	0.0393	0.0013	.00013	1.359	1	$\frac{0.0013}{3}$	133.322
Bar	14.5	401	29.53	0.987	1.02	1020	750	1	$10^5$
Pa	0.00014	0.0040	0.00029	$0.987 \times 10^{-5}$	$0.102 \times 10^{-4}$	0.01	0.0075	$10^{-5}$	1

La presión puede medirse en valores absolutos o diferenciales. En la figura 18 se indican las clase de presión que los instrumentos miden comúnmente en la industria.



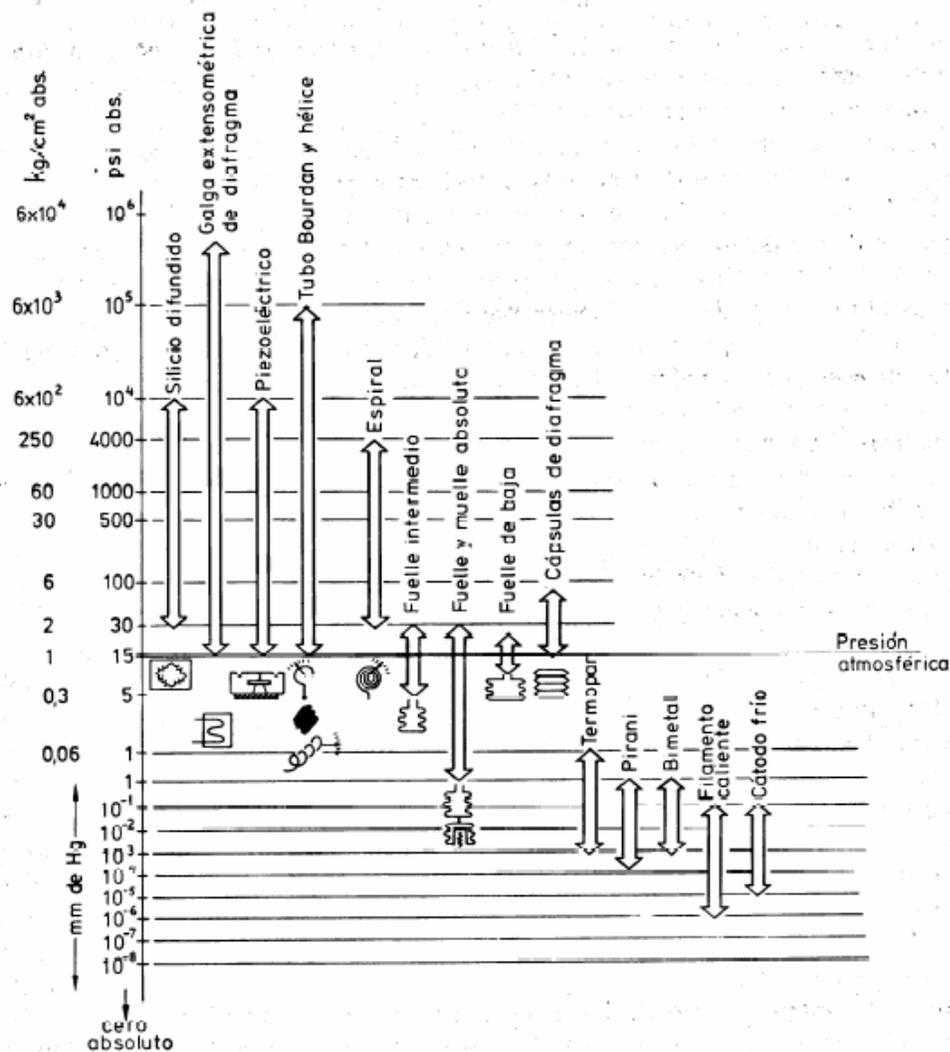
La presión absoluta se mide con relación al cero absoluto de presión (puntos A y A' de la figura 18).

La presión atmosférica es la presión ejercida por la atmósfera terrestre medida mediante un barómetro. A nivel del mar, esta presión es próxima a 760 mm (29.9 pulgadas) de mercurio absolutos a 14.7 psia (libras por pulgada cuadrada absolutas) y estos valores definen la presión ejercida por la atmósfera estándar.

La presión manométrica es la determinada por un elemento que mide la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica del lugar donde se efectúa la medición (punto B de la figura). Hay que señalar que al aumentar o disminuir la presión atmosférica, disminuye o aumenta respectivamente la presión leída (puntos B' y B'' figura 18), si bien ello es despreciable al medir presiones elevadas.

La presión diferencial es la diferencia entre dos presiones, puntos C y C' (figura 18), y por último, el vacío es la diferencia de presiones entre la presión atmosférica existente y la presión absoluta, es decir, es la presión medida por debajo de la atmosférica (puntos D, D' y D'' en la figura 18). Viene expresada en mm columna de mercurio, mm columna de agua o pulgadas columna de agua. Las variaciones de la presión atmosférica influyen considerablemente en las lecturas de vacío.

Figura 19 Instrumentos de presión y campo de aplicación



Fuente: Antonio Creus. Instrumentación Industrial Pág. 73

El campo de aplicación de los medidores de presión es amplio y abarca desde valores muy bajos (vacío) hasta presiones de miles de bar. En la figura 19 pueden verse los tipos de instrumentos y sus campos de aplicación.

## 2.2. Elementos mecánicos

Se dividen en: Primero. Elementos primarios de medida directa que mide la presión comparándola con la ejercida por un líquido de densidad y altura conocidas (barómetro cubeta, manómetro de tubo en U, manómetro de tubo inclinado, manómetro de toro pendular, manómetro de campana), y, Segundo. Elementos primarios que se deforman por la presión interna del fluido que contienen.

Los elementos primario elásticos más empleado son. El tubo *Bourdon*, el elemento en espiral, el helicoidal, el diafragma y el fuelle.

El tubo *Bourdon* es un tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo, cerrado por un extremo. Al aumentar la presión en el interior del tubo, éste tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora, por un sector dentado y un piñón. La ley de deformación del tubo *Bourdon* compleja y ha sido determinada a través de numerosas observaciones y ensayo en varios tubos. Los materiales empleados de acuerdo a la aplicación en el tubo *Bourdon* son el acero inoxidable, aleación de cobre o aleaciones especiales como hastelloy y monel.

El elemento en espiral se forma enrollando el tubo *Bourdon* en forma de espiral alrededor de un eje común, y el helicoidal arrollando mas de una espira en forma de hélice. Estos elementos proporcionan un desplazamiento grande del extremo libre y por ello son ideales para los registradores.

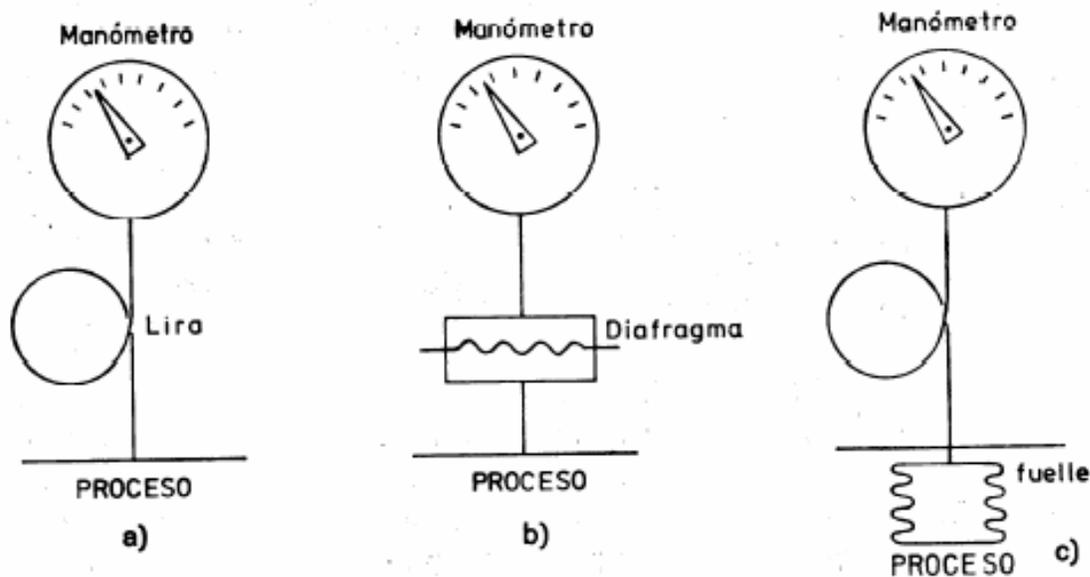
El diafragma consiste en una o varias cápsulas circulares conectadas rígidamente entre si por soldadura, de forma que al aplicar presión, cada cápsula se deforma y la suma de los pequeños desplazamientos es amplificada por un juego de palancas. Al aplicar presión, el movimiento se aproxima a una relación lineal en un intervalo de medida lo mas amplio posible con un mínimo de histéresis y de desviación permanente en el cero del instrumento. El material del diafragma normalmente es aleación de níquel o iconel x. Se utiliza para pequeñas presiones.

El fuelle es parecido al diafragma compuesto, pero de una sola pieza flexible axialmente, y puede dilatarse o contraerse con un desplazamiento considerable, se caracteriza por su larga duración, demostrada en ensayos en los que ha soportado sin deformación alguna millones de ciclos de flexión. El material empleado para el fuelle es usualmente bronce fosforoso y el muelle es tratado térmicamente para mantener fija su constante de fuerza por unidad de compresión.. Se emplean para pequeñas presiones.

Los medidores de presión absoluta consisten en un conjunto de fuelle y muelle opuesto a un fuelle sellado al vacío absoluto. El movimiento resultante de la unión de los dos fuelles equivale a la presión absoluta del fluido. El material empleado para fuelles es latón o acero inoxidable. Se utilizan para la medida exacta y el control preciso de bajas presiones, a las que puedan afectar las variaciones en la presión atmosférica. Por ejemplo, Cuando se emplea un vacuómetro para el mantener una presión absoluta de 50 mm de mercurio, en una columna de destilación, el punto de consigan seria 710 mm, con una presión atmosférica de 760 mm. Si la presión atmosférica cambiase a 775 mm el vacuómetro indicaría:  $710 + 15 = 725$  mm con lo cual la presión absoluta en la columna seria controlada a  $50 + 15 = 65$  mm, es decir a un 30 % mas de la deseada.

En la medida de presiones de fluidos corrosivos, pueden emplearse elementos primario elásticos con materiales especiales en contacto directo con el fluido. Sin embargo, en la mayoría de los casos es más económico utilizar un fluido de sello. Cuando el fluido es altamente viscoso obtura el o bien, cuando la temperatura del proceso es demasiado alta. Tal como ocurre en la medición de presión de vapor de agua en que el agua condensada aísla el tubo Bourdon de la alta temperatura del vapor (figura 20 a).

Figura 20 Tipos de sellos



Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 75

Se emplean asimismo sellos volumétricos de diafragma y de fuelle (figura 20 b y c) que contienen un líquido incompresible para la transmisión de la presión.

En la tabla V puede verse las características de los elementos mecánicos descritos.

Tabla V **Elementos mecánicos**

	<i>Campo de Medida</i>	<i>Precisión en % de toda la escala</i>	<i>Temperatura máxima de trabajo</i>	<i>Presión Estática Máxima</i>
Barómetro cubeta	0.1 – 3 m cda	0.5 – 1 %	Ambiente	6 bar
Tubo en U	0.2 – 1.2 m cda	0.5 – 1 %	↓	10 bar
Tubo Inclinado	0.01 – 1.2 m cda	↓	↓	10 bar
Toro pendular	0.5 – 10 m cda	↓	↓	100 – 600 bar
Manómetro Campana	0.005 – 1 m cda	↓	↓	Atmosférica
Tubo <i>Bourdon</i>	0.5 – 6,000 bar	↓	90° C	6,000 bar
Espiral	0.5 – 2,500 bar	↓	↓	2,500 bar
Helicoidal	0.5 – 5,000 bar	↓	↓	5,000 bar
Diafragma	50 mm cda – 2 bar	↓	↓	2bar
Fuelle	100 mm cda – 2 bar	↓	↓	2bar
Presión absoluta	6 – 760 mm Hg abs	1 5	Ambiente	Atmosférica
Sello volumétrico	3 – 600 bar	0.5 – 1 %	400° C	600 bar

cda = columna de agua

### 2.3. Elementos neumáticos

Como elementos neumáticos consideramos los instrumentos transmisores neumáticos estudiados en el capítulo anterior cuyo elemento de medida es de presión, adecuado al campo de medida correspondiente. El tipo de transmisor queda establecido por el campo de media del elemento según la figura 19. Es obvio que, por ejemplo, un transmisor de 0 – 20 kg/cm<sup>2</sup> utilizará un transmisor de equilibrio de fuerzas de tubo *Bourdon*, mientras que uno de 3 – 15 psi será de equilibrio de movimientos con elemento de fuelle.

### 2.4. Elementos electromecánicos

Los elementos electromecánicos de presión utilizan un elemento mecánico elástico combinado con un transductor eléctrico que genera la señal eléctrica correspondiente. El elemento mecánico consisten en un tubo *Bourdon*, espiral, hélice, diafragma, fuelle o una combinación de los mismos que, a través de un sistema de palanca convierte la presión en una fuerza o en un desplazamiento mecánico.

Los elementos electromecánicos de presión se clasifican según el principio de funcionamiento en los siguientes tipos:

- Transmisores electrónico de equilibrio de fuerzas.
- Resistivos.
- Magnéticos.
- Capacitivos.
- Extensiométricos.
- Piezoeléctricos.

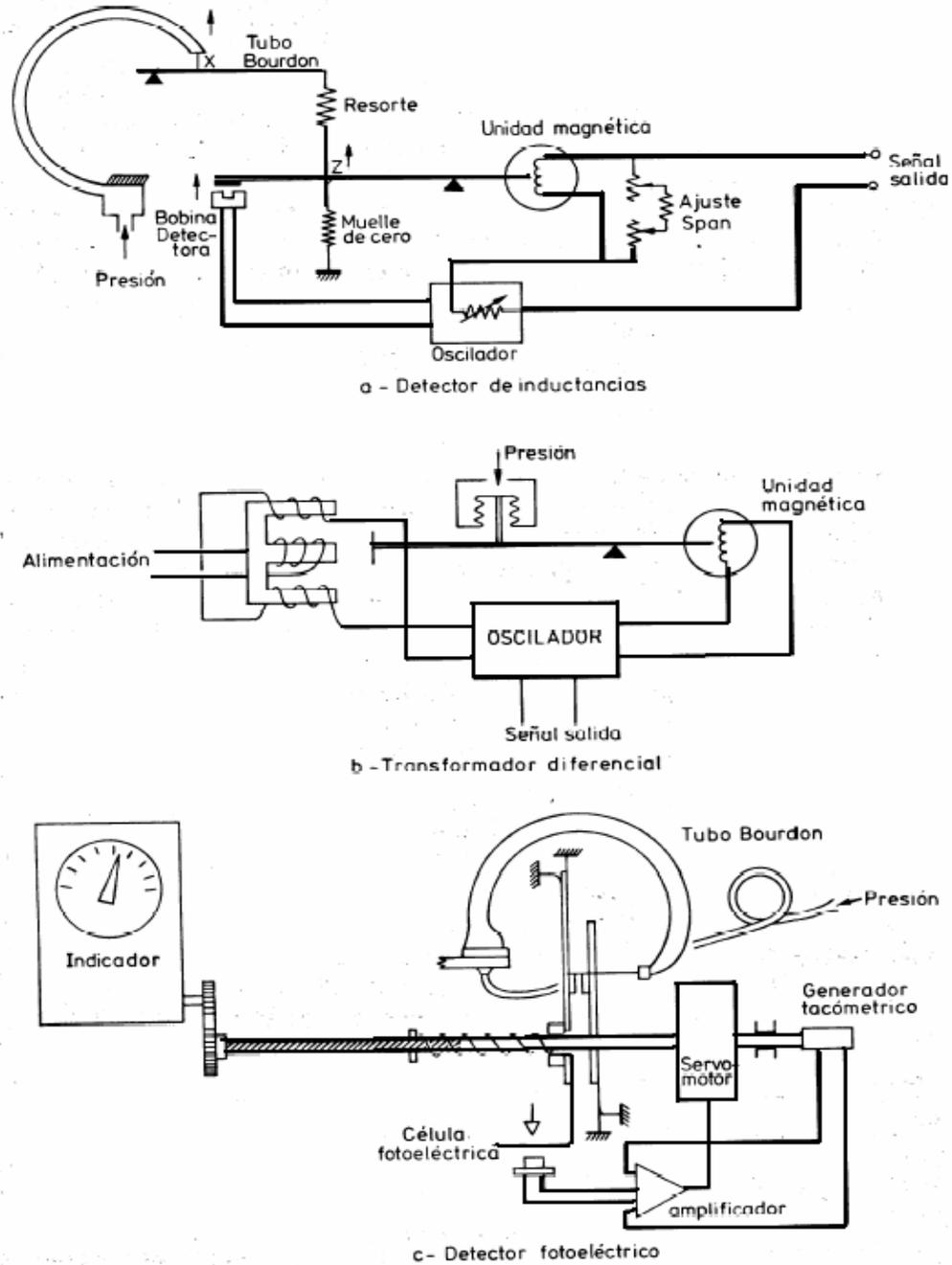
#### **2.4.1. Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas**

En la figura 21 está representado un transmisor de este tipo que ya ha sido descrito en el apartado 1.3.2 de transmisores electrónicos. En este instrumento el elemento mecánico de medición ( tubo *Bourdon* espiral, fuelle...) ejerce una fuerza sobre una barra rígida del transmisor.

Para cada valor de la presión, la barra adopta una posición determinada excitándose un transductor de desplazamiento tal como un detector de inductancia, un transformador diferencial o bien un detecto fotoeléctrico. Un circuito oscilador asociado con cualquiera de estos detectores alimenta una unidad magnética y la fuerza generada reposiciona la barra de equilibrio de fuerzas. Se completa así un circuito de realimentación variando la corriente de salida en forma proporcional al intervalo de presiones del proceso.

El detector de posición de inductancia y el transformador diferencial han sido ya estudiados anteriormente.

Figura 21 Transmisor electrónico de equilibrio de fuerzas



Fuente: Antonio Creus. Instrumentación Industrial Pág. 77

En el transmisor de equilibrio de fuerzas con detector fotoeléctrico (figura 21 c) la barra rígida tiene en su extremo una ventanilla ranurada que interrumpe total o parcialmente un rayo de luz que incide en una célula fotoeléctrica de dos elementos. Esta célula forma parte de un circuito de puente Wheatstone autoequilibrado y, por lo tanto, cualquier variación de presión que cambie la barra de posición, moverá la ventana ranurada y desequilibrará el puente. La señal diferencial que se produce en los dos elementos de la célula es amplificada y excita un servomotor. Este, al girar, atornilla una varilla roscada la cual comprime un resorte de realimentación que a su vez aprieta la barra de equilibrio de fuerzas con una fuerza tal que compensa la fuerza desarrollada por el elemento de presión. De este modo, el sistema se estabiliza a una nueva posición de equilibrio. Este transmisor dispone de un controlador óptico-mecánico acoplado al servomotor que señala los valores de presión en una pantalla exterior.

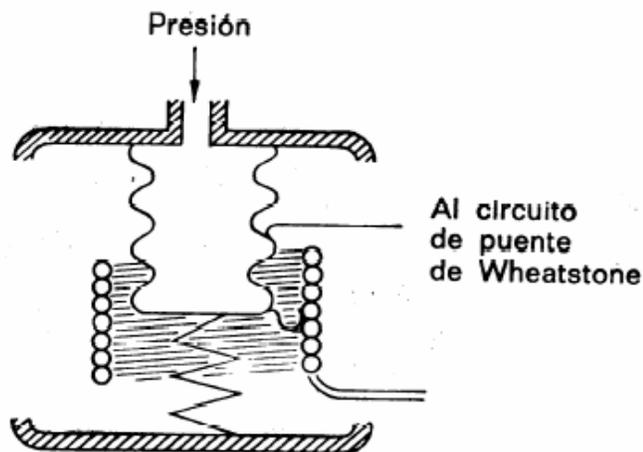
Los transductores electrónicos de equilibrio de fuerzas se caracterizan por tener un movimiento muy pequeño de la barra de equilibrio, poseen realimentación, una elasticidad muy buena y un nivel alto de señal de salida. Por su constitución mecánica presentan un ajuste del cero y del alcance (*span*) complicado y una alta sensibilidad a vibraciones y su estabilidad en el tiempo es de media a pobre.

Su intervalo de medida corresponde al del elemento mecánico que utiliza y su precisión es del orden de 0.5 – 1 %.

### 2.4.2. Transductores resistivos

Constituyen, sin duda, uno de los transmisores eléctricos más sencillos. Consisten en un elemento elástico (tubo *Bourdon* o cápsula) que varía la resistencia óhmica de un potenciómetro en función de la presión. El potenciómetro puede adoptar la forma de un solo hilo continuo o bien estar arrollado a una bobina siguiendo un valor lineal o no de resistencia. Existen varios tipos de potenciómetros según sea el elemento de resistencia: potenciómetros de grafito, de resistencia bobinada, de película metálica y de plástico moldeado. En la figura 22 puede verse un transductor resistivo representativo que consta de un muelle de referencia, el elemento de presión y un potenciómetro de precisión. El muelle de referencia es el corazón del transductor ya que su desviación al comprimirse debe ser únicamente una función de la presión y además deber ser independiente de la temperatura, de la aceleración y de otros factores ambientales externos.

Figura 22 Transductor resistivo



Fuente: Antonio Creus. *Instrumentación Industrial* Pág. 78

El movimiento del elemento de presión se transmite a un brazo móvil aislado que se apoya sobre el potenciómetro de precisión. Este está conectado a un circuito de puente de Wheatstone.

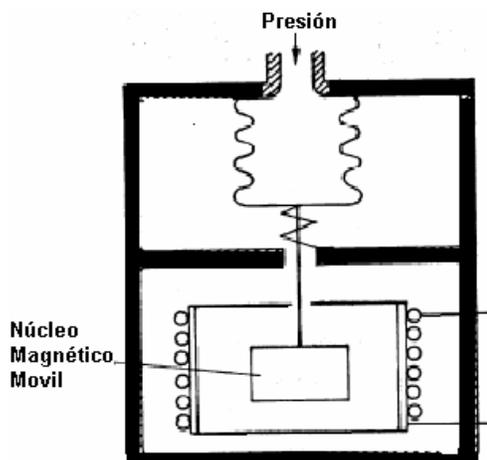
Los transductores resistivos son simples y su señal de salida es bastante potente como para proporcionar una corriente de salida suficiente para el funcionamiento de los instrumentos de indicación sin necesidad de amplificación. Sin embargo, son insensibles a pequeños movimientos del contacto del cursor, muy sensibles a vibraciones y presentan una estabilidad pobre en el tiempo.

El intervalo de medida de estos transductores corresponde al elemento de presión que utilizan y varía en general de 0 – 0.1 a 0 – 300 kg/cm<sup>2</sup>. La precisión es del orden de 1 – 2%.

### 2.4.3. Transductores magnéticos

#### 2.4.3.1. Transductores de inductancia variable

Figura 23 Transductor de inductancia variable



Fuente: Antonio Creus. Instrumentación Industrial Pág. 79

En estos transductores el desplazamiento de un núcleo móvil dentro de una bobina aumenta la inductancia de esta en forma casi proporcional a la porción de metálica del núcleo contenido dentro de la bobina.

El devanado de la bobina se alimenta con una corriente alterna y la f.e.m. de autoinducción generada se opone a la f.e.m. de alimentación, de tal modo que al ir penetrando el núcleo móvil dentro de la bobina la corriente presente en el circuito se va reduciendo por aumentar la f.e.m. de autoinducción.

El transformador diferencial estudiado en los transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas es también un transductor de inductancia variable, si bien, en lugar de considerar una sola bobina con un núcleo móvil, se trata de tres bobinas en las que la bobina central o primaria es alimentada con una corriente alterna y el flujo magnético generado induce tensiones en las otras dos bobinas, con la particularidad de que si el núcleo esta en el centro, las dos tensiones son iguales y opuestas y si se desplazan a la derecha o a la izquierda, las tensiones son distintas. Es decir, que el transformador diferencial es mas bien un aparato de relación de inductancias.

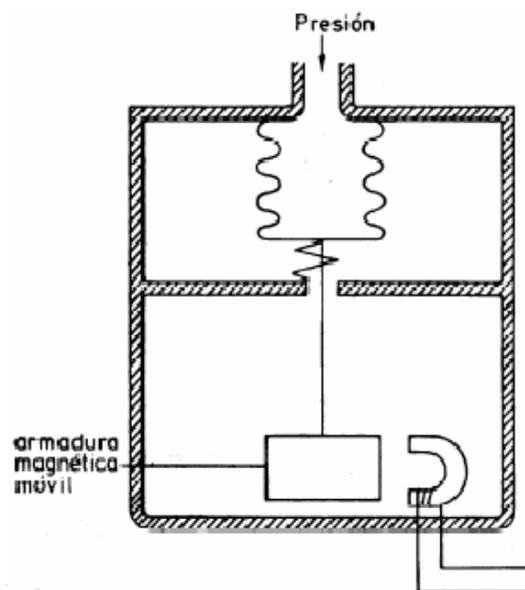
Los transductores de inductancia variable tiene las siguientes ventajas: no producen rozamiento en la medición, tienen una respuesta lineal, son pequeños y de construcción robusta y no precisan ajustes críticos en el montaje. Su precisión es del orden de  $\pm 1\%$ .

#### **2.4.3.2. Transductores de reluctancia variable**

Consisten en un imán permanente o un electroimán que crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético.

El circuito magnético se alimenta con una fuerza magnetomotriz constante con lo cual al cambiar la posición de la armadura varia la reluctancia y por lo tanto el flujo magnético. Esta variación de flujo da lugar a una corriente inducida en la bobina que es, por tanto, proporcional al grado de desplazamiento de la armadura móvil.

Figura 24 **Transductor de reluctancia variable**



Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 80

El movimiento de la armadura es pequeño ( del orden de un grado como máximo en armadura giratorias) sin contacto alguno con las partes fijas, por lo cual no existen rozamientos eliminándose la histéresis mecánica típica de otros instrumentos. Los transductores de reluctancia variable presenta una alta sensibilidad a las vibraciones, una estabilidad media en el tiempo y son sensibles a la temperatura. Su precisión es del orden de  $\pm 0.5 \%$ .

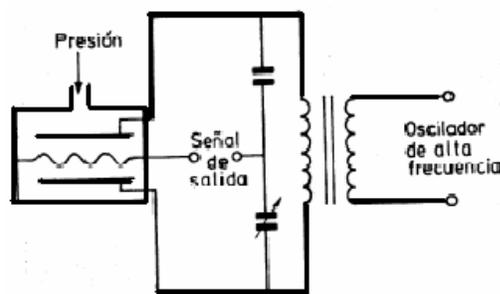
Ambos tipos de transductores posicionan el núcleo o la armadura móviles con un elemento de presión (tubo *Bourdon*, espira...) y utilizan circuitos electrónicos bobinados de puente de inductancias de corriente alterna.

#### 2.4.4. Transductores capacitivos

Se basan en la variación de capacidad que se produce en un condensador al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión (figura 25). La palca móvil tiene forma de diafragma y se encuentra situada entre dos placas fijas. De este modo se tienen dos condensadores uno de capacidad fija o de referencia y el otro de capacidad variable, que pueden compararse en un circuitos oscilantes o bien en circuitos de puente Wheatstone alimentados con corriente alterna.

Los transductores capacitivos se caracterizan por su pequeños tamaños y su construcción robusta, tienen un pequeño desplazamiento volumétrico y son adecuado para medidas estáticas y dinámicas. Su señal de salida es débil por lo que precisa de amplificadores con el riesgo de introducir errores en la medición. Son sensibles a las variaciones de temperatura y a las aceleraciones transversales y precisan de un ajuste de los circuitos oscilantes y de los puentes de c.a. a los que están acoplados.

Figura 25 Transductor capacitivo



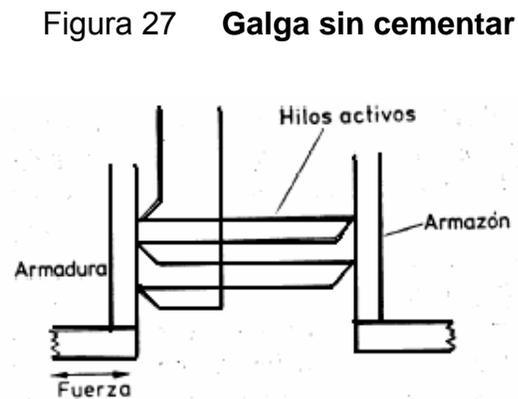
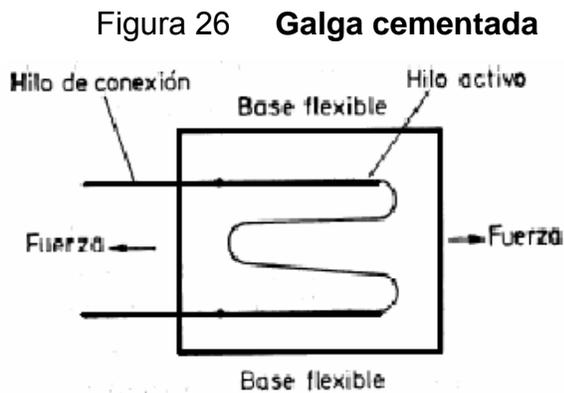
Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 81

Su intervalo de medida es relativamente amplio, entre 0.05 – 5 a 0.5 – 600 bar y su precisión es del orden de  $\pm 0.2$  a  $\pm 0.5$  %.

#### 2.4.5. Galgas extensiométricas

Se basan en la variación de longitud y de diámetro, y por lo tanto de resistencia, que tiene lugar cuando un hilo de resistencia se encuentra sometido a una tensión mecánica por la acción de una presión.

Existen dos tipos de galgas extensiométricas: galgas cementadas (figura 26) formadas por varios bucles de hilo muy fino que están pegados a una hoja base de cerámica papel o plástico, y galgas sin cementar (figura 27) en las que los hilos de resistencia descansan entre un armazón fijo y otro móvil bajo una ligera tensión inicial.

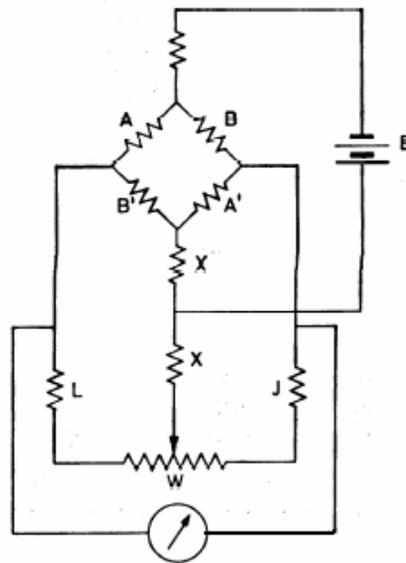


Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 81

En ambos tipos de galgas, la aplicación de presión estira o comprime los hilos según sea la disposición que el fabricante haya adoptado, modificando pues la resistencia de los mismos.

La galga forma parte de un puente de Wheatstone (figura 28) y cuando esta sin tensión tiene una resistencia eléctrica determinada. Se aplica al circuito una tensión nominal tal que la pequeña corriente que circula por la resistencia crea una caída de tensión en la misma y el puente se equilibra para estas condiciones. Cualquier variación de presión que mueva el diafragma del transductor cambia la resistencia de la galga y desequilibra el puente. El intervalo de medida de estos transductores varía de 0 – 0.6 a 0 – 10,000 bar y su precisión es del orden de  $\pm 0.5 \%$ .

Figura 28 **Puente de Wheatstone para galga extensiométrica**

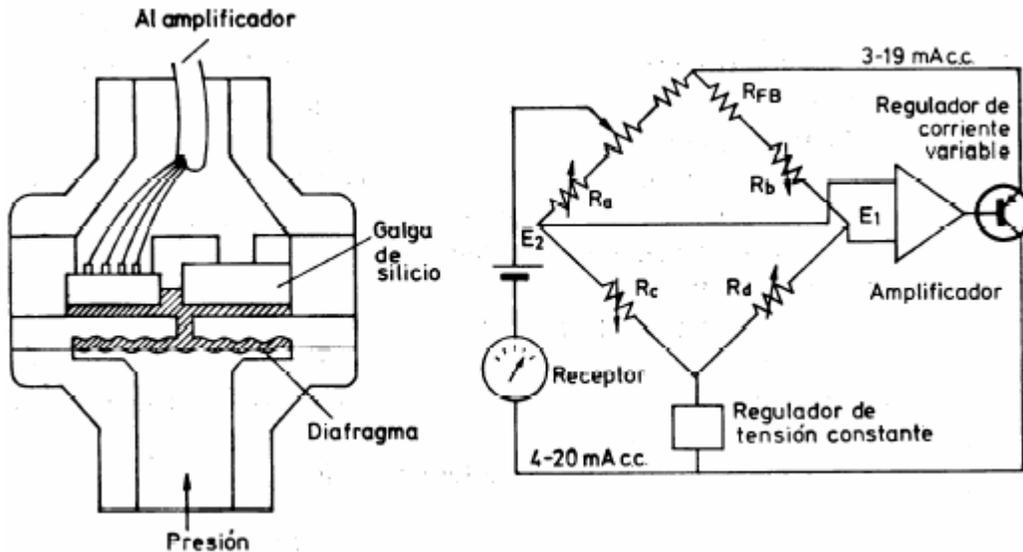


Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 82

Una innovación de la galga extensiométrica la incluyen los transductores de presión de silicio difundido y consiste en un elemento de silicio situado dentro de una cámara conteniendo silicona que está en contacto con el proceso a través de un diafragma flexible. El sensor está fabricado a partir de un monocristal de silicio en cuyo seno se difundió boro para formar varios puentes de Wheatstone constituyendo así una galga extensiométrica autocontenida. El espesor del sensor determina el intervalo de medida del instrumento.

El sensor con su puente de Wheatstone incorporado forma parte del circuito de la figura 29.

Figura 29 Transductor de presión de silicio difundido



Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 83

Cuando no hay presión las tensiones  $E_1$  y  $E_2$  son iguales y, al aplicar la presión del proceso  $R_b$  y  $R_e$  disminuyen su resistencia y  $R_a$  y  $R_d$  la aumentan dando lugar a caídas de tensión distintas y una diferencia entre  $E_1$  y  $E_2$ .

Esta diferencia se aplica a un amplificador diferencial de alta ganancia que controla un regulador de corriente variable. Un margen de corriente continua de 3 a 19 mA con 1 mA del puente produce una señal de salida de 4 a 20 mA c.c. Esta corriente circula a través de la resistencia de realimentación  $R_{fb}$  y produce una caída de tensión que equilibra el puente. Como esta caída es proporcional a  $R_{fb}$  esta resistencia fija el intervalo de medida (*span*) del transductor. El cero del instrumento se varia intercalando resistencias fijas en el brazo izquierdo del puente (cero basto) y un potenciómetro en el brazo derecho (cero fino).

La adición de un microprocesador permite añadir inteligencia al instrumento al hacer posible funciones adicionales, tales como la compensación de temperatura ambiente, proporcionando un aumento de la precisión de la medida, en particular si la señal de salida del instrumento es enteramente digital en lugar de analógica e 4 – 20 mA c.c.

El intervalo de medida de los transductores de silicio difundido varia de 0 –2 a 0 – 600 bar, con una precisión del orden de  $\pm 0.2\%$ .

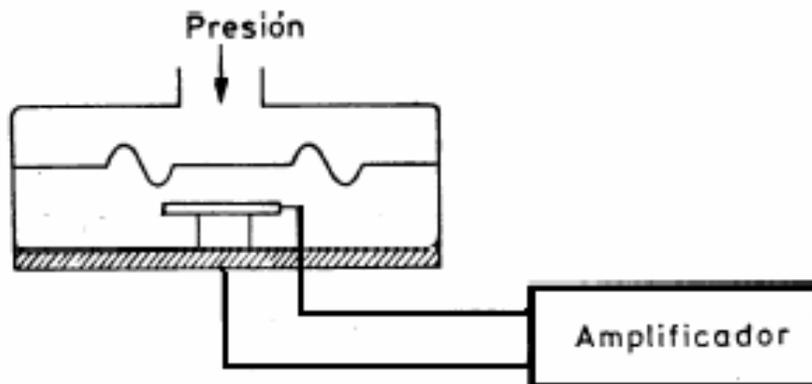
La galgas extensiométricas puede alimentarse con c.c. o c.a. Tiene una respuesta de frecuencia excelente y pueden utilizarse en medidas estáticas y dinámicas. Presentan una compensación de temperatura relativamente fácil y generalmente no son influidas por campos magnéticos. Con excepción de las galgas de silicio difundido poseen las siguientes desventajas: señal de salida débil, pequeño movimiento de la galga, alta sensibilidad a vibraciones y estabilidad dudosa a lo largo del tiempo de funcionamiento. La galga de silicio difundido tiene la ventaja adicional de estar en contacto directo con el proceso sin mecanismos intermedios de medición de la presión pudiendo así trabajar correctamente aunque el fluido se deposite parcialmente sobre el diafragma del elemento ya que mide directamente la presión del fluido y no la fuerza que este hace sobre el diafragma.

#### **2.4.6. Transductores piezoeléctricos**

Los elementos piezoeléctricos (figura 30) son materiales que al deformarse físicamente por la acción de una presión, generan una señal eléctrica.

Los materiales típicos en los transductores piezoeléctricos son el cuarzo y el titanato de bario, capaces de soportar temperaturas del orden de 150° C en servicio continuo y de 230° C en servicio intermitente.

Figura 30 **Transductor piezoeléctrico**



Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 83

Son elementos ligeros de pequeño tamaño y de construcción robusta. Su señal de respuesta a una variación de presión es lineal y son adecuados para medidas dinámicas, al ser capaces de respuestas frecuenciales de hasta un millón de ciclos por segundo. Tienen la desventaja de ser sensibles los cambios en la temperatura y experimentar desajuste en el cero y precisar ajuste de impedancias en caso de fuerte golpe. Asimismo, sus señal de salida es relativamente débil por lo que precisan de amplificadores y acondicionadores de señal que pueden introducir errores en la medición.

## 2.5. Elementos electrónicos de vacío

Los transductores electrónicos de vacío se emplean para la medida de alto vacío, son muy sensibles y se clasifican en los siguientes tipos:

### **2.5.1. Transductores mecánicos de fuelles y de diafragma**

Trabajan en forma diferencial entre la presión atmosférica y la de proceso. Pueden estar compensados con relación a la presión atmosférica y calibrados en unidades absolutas. Al ser dispositivos mecánicos, las fuerzas disponibles a presiones del gas muy bajas son tan pequeñas que estos instrumentos no son adecuados para la medida de alto vacío, estando limitados a valores de 1 mm Hg absolutos. Pueden llevara acoplados transductores eléctricos del tipo galga extensiométrica o capacitivos.

### **2.5.2. Medidor McLeod**

Se utilizan como aparatos de calibración de los restantes instrumentos. Se basa en comprimir una muestra del gas de gran volumen conocido a un volumen más pequeño y a mayor presión mediante una columna de mercurio en un tubo capilar. La presión del gas se deduce aplicando la ley de Boyle-Mariotte. Su intervalo de medida es de  $5 - 10^{-5}$  mm Hg.

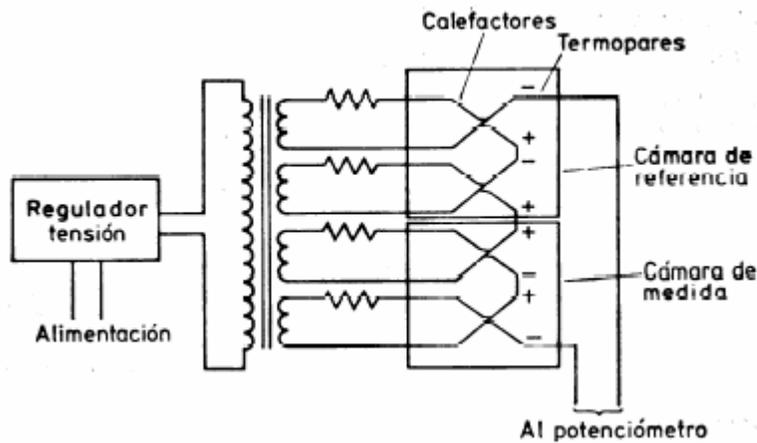
### **2.5.3. Transductores térmicos**

Se basan en el principio de la proporcionalidad entre la energía disipada desde la superficie caliente de un filamento calentado por una corriente constante y la presión del gas ambiente cuando el gas esta a bajas presiones absolutas.

El *transductor térmico de termopar* contiene un filamento en V que lleva incorporado un pequeño termopar (figura 31). Al pasar una corriente constante a través del filamento, su temperatura es inversamente proporcional a la presión absoluta del gas.

La f.e.m. generada por el termopar indica la temperatura del filamento y por lo tanto señala el vacío del ambiente. Para compensar la temperatura ambiente se emplea una segunda unidad contenida dentro de un tubo sellado al vacío. La señal de salida diferencial de los dos termopares es proporcional a la presión.

Figura 31 **Transductor térmico de termopar**

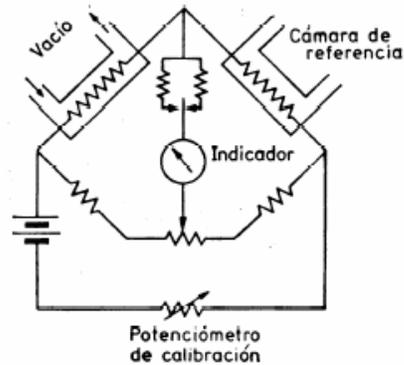


Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 86

Las ventajas principales de este tipo de transductor residen en su bajo costo, larga duración y confiabilidad. Tiene el inconveniente de ser sensible a la composición del gas, poseer características no lineales y presentar el riesgo de combustión si se expone a presión atmosférica cuando el filamento está caliente. Su intervalo de medida es de  $0.5 - 10^{-3}$  mm Hg.

El *transductor Pirani* (figura 32) utiliza un circuito de puente Wheatstone que compara las resistencias de dos filamentos de tungsteno, uno sellado en alto vacío en un tubo y el otro en contacto con el gas medido y que por lo tanto pierde calor por conducción. En este transductor la resistencia del filamento es la que refleja la presión en lugar de ser su temperatura.

Figura 32 **Transductor Pirani**

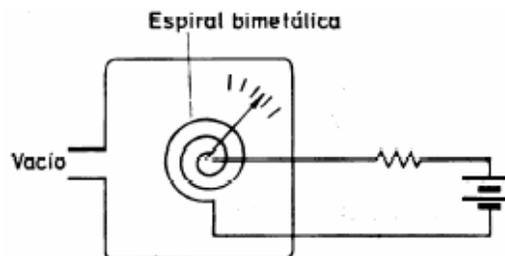


Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 86

El transductor Pirani tiene la ventaja de ser compacto y sencillo de funcionamiento, pudiendo estar a presión atmosférica sin peligro de combustión. Tiene el inconveniente de que su calibración depende de la composición del gas medido y de ser altamente no lineal. Su intervalo de medida es de  $2 - 10^{-3}$  mm Hg.

El *transductor bimetalico* (figura 40) utiliza una espiral bimetalica calentada por una fuente de tensión estabilizada. Cualquier cambio en la presión produce una deflexión de la espiral, que a su vez esta acoplada a un índice que señala la escala de vacío. Su intervalo de medida es de  $1 - 10^{-3}$  mm Hg.

Figura 33 **Transductor bimetalico**

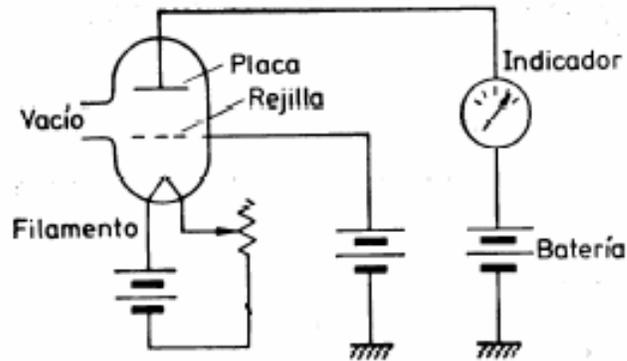


Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 87

#### 2.5.4. Transductores de ionización

Se basan en la formación de los iones que se producen en las colisiones que existen entre moléculas y electrones (o bien partículas alfa en el tipo de radiación). La velocidad de formación de estos iones, es decir la corriente iónica, varía directamente con la presión.

Figura 34 **Transductor de filamento caliente**

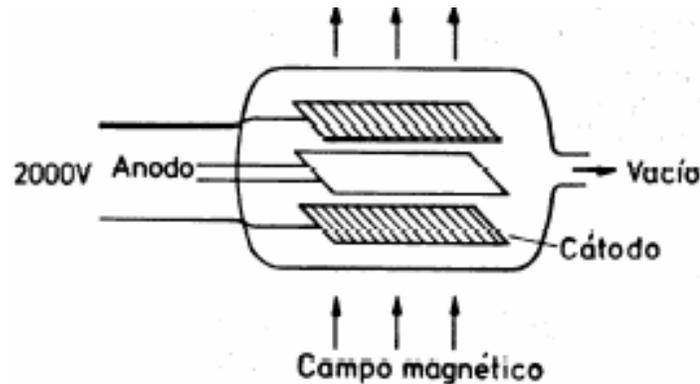


Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 87

El *transductor de filamento caliente* (figura 34) consiste en un tubo electrónico con un filamento de tungsteno rodeado por una rejilla en forma de bobina, la cual a su vez está envuelta por una placa colectora. Los electrones emitidos por el filamento caliente se aceleran hacia la rejilla positiva, pasan a través de ella y, en su camino hacia la placa colectora de carga negativa, algunos colisionan con moléculas del gas. La corriente positiva formada es una función del número de iones y por lo tanto, constituye una medida de la presión del gas. Estos instrumentos son muy delicados y deben manejarse con cuidado. El filamento puede quemarse si se somete accidentalmente a presiones superiores a  $1 \times 10^{-3}$  mmHg absolutos.

Estos transductores son muy sensibles y capaces de medir vacíos extremadamente altos. Su señal eléctrica de salida es lineal con la presión. Tienen el inconveniente de ser sensibles a la composición del gas, de tal modo que en ocasiones el filamento caliente provoca cambios significativos en su composición entre el volumen medido y el volumen contenido dentro del tubo electrónico. El intervalo de medida de estos transductores es de  $10^{-3}$  a  $10^{-11}$  mm Hg.

Figura 35 **Transductor de cátodo frío**



Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 88

El transductor de *cátodo frío* (figura 35) se basa en el principio de la medida de una corriente iónica producida por una descarga de alta tensión. Los electrones desprendidos del cátodos toman un movimiento en espiral al irse moviendo a través de un campo magnético en su camino hacia el ánodo. El movimiento en espiral da lugar a que el camino libre medio entre electrones sea mayor que la distancia entre electrodos. Por consiguiente, aumenta la posibilidad de colisiones con la moléculas del gas presente lo que da lugar a una mayor corriente iónica y de este modo la descarga catódica se mantiene a una presión mas baja, o sea a un vacío más alto.

Este instrumento no puede vaciarse de gases tan rápidamente como el de filamento caliente, pero es más robusto y no presenta el problema de la combustión del filamento. Es susceptible a contaminación por el mercurio y puede provocar la descomposición química de vapores orgánicos a altas tensiones. Su campo de aplicación abarca de  $10^{-2}$  a  $10^{-7}$  mm Hg., con una escala logarítmica.

Tabla VI **Transductores electrónicos de vacío**

	Margen (torrs)	Escala	Precisión
Mecánicos	760 – 5	Lineal	1 %
McLeod	$5 - 10^{-5}$		1 – 10 % lectura
Térmicos	Termopar	Logarítmica	Alta
	Pirani		---
	Bimetal		---
Ionización	Filamento Caliente		---
	Cátodo Frío		$10^{-2} - 10^{-7}$

Fuente: Antonio Creus. **Instrumentación Industrial** Pág. 88

### 3. APLICACIONES DE LOS TRANSMISORES DE PRESIÓN EN LA MEDICIÓN DE FLUJO Y NIVEL

#### 3.1. Instrumentos de presión diferencial para la medición de flujo

Existen varios métodos para medir el flujo, según sea el tipo de flujo volumétrico o másico deseado. Entre los transductores de presión diferencial para esta aplicación figuran los siguientes.

Figura 36 **Medidores de presión diferencial para flujo**

	<i>Sistema</i>	<i>Elemento</i>		<i>Transmisor</i>
Medidores de flujo volumétrico	Presión Diferencial	Placa de Orificio Tobera Tubo Venturi Tubo Pitot Tubo Annubar Medidor tipo Cuña Medidor tipo Cono	Conectados a tubo en U o elemento de fuelle o diafragma	Equilibrio de fuerzas
				Silicio Difundido
Medidores de flujo másico	Compensación de presión y temperatura en medidores volumétricos			

Los medidores volumétricos de presión diferencial determinan el caudal en volumen del fluido, indirectamente por deducción.

Hay que señalar que la medida del flujo o caudal volumétrico en la industria se efectúa principalmente con elementos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido. Entre estos elementos los mas destacados son la placa de orificio o diafragma, la tobera y el tubo Venturi.

### 3.1.1. Fórmula general

La fórmula de caudal obtenida con los elementos de presión diferencial se basa en la aplicación del teorema de Bernoulli (altura cinética + altura de presión + altura potencial = cte) a una tubería horizontal (figura 38). En la figura 37 pueden verse los valores de las presiones a lo largo de una tubería en una placa de orificio o diafragma.

Figura 37 Presión diferencial creada por la placa de orificio

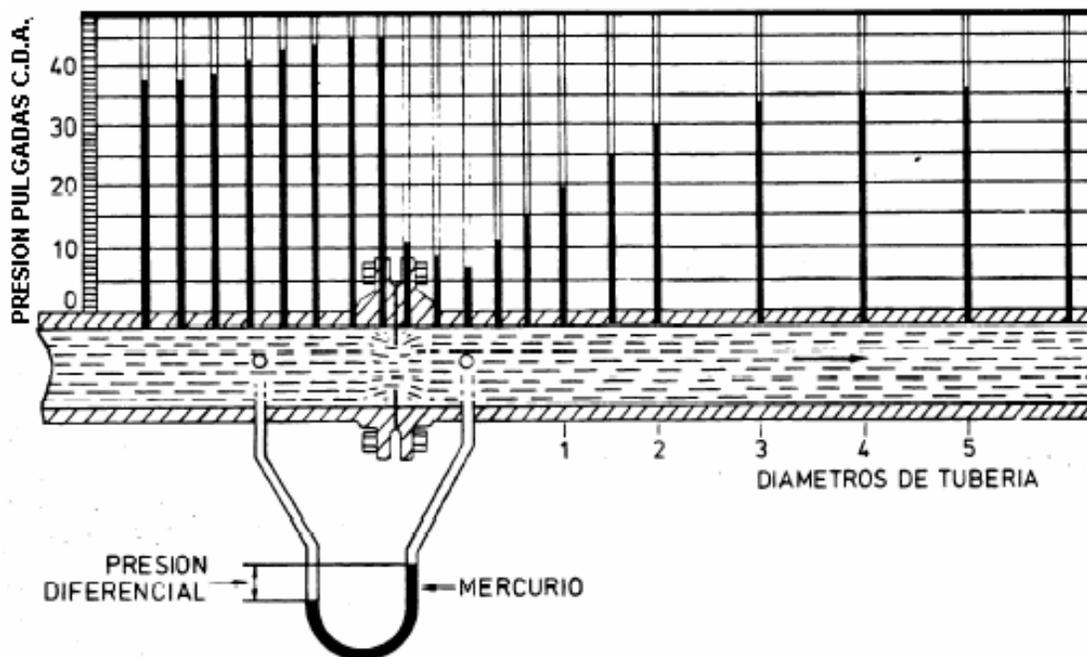
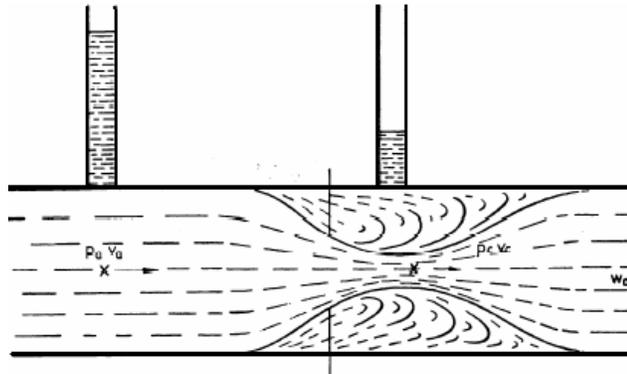


Figura 38 Teorema de Bernoulli



Si  $P_a$ ,  $P_c$  y  $V_a$ ,  $V_c$ , son las presiones absolutas y velocidades en la zona anterior a la placa donde el fluido llena todo el conducto y en la vena contraída respectivamente, y  $S_a$ ,  $S_c$  son las secciones correspondientes, resulta:

$$\frac{V_a^2}{2} + \frac{P_a}{\rho_0} = \frac{V_c^2}{2} + \frac{P_c}{\rho_0} \text{ Ecuación de Energía}$$

$$S_a V_a = S_c V_c \text{ Ecuación de Continuidad}$$

siendo  $\rho_0$  la densidad (masa por unidad de volumen) del fluido, habiendo supuesto que  $\rho_0$  no varía en toda la longitud estudiada en la vena.

De aquí se obtiene:

De la ecuación de continuidad obtenemos:

$$S_a V_a = S_c V_c \rightarrow V_a = \frac{S_c V_c}{S_a}$$

De la ecuación de energía tenemos:

$$\frac{V_c^2}{2} - \frac{V_a^2}{2} = \frac{P_a - P_c}{\rho_0} \rightarrow V_c^2 - V_a^2 = 2 \left( \frac{P_a - P_c}{\rho_0} \right)$$

Sustuyendo  $V_a$ :

$$V_c^2 - \frac{S_c^2 V_c^2}{S_a^2} = 2 \left( \frac{P_a - P_c}{\rho_0} \right)$$

$$V_c^2 \left( 1 - \frac{S_c^2}{S_a^2} \right) = 2 \left( \frac{P_a - P_c}{\rho_0} \right)$$

*Pero:*

$$S_c = \frac{\pi d^2}{4} \rightarrow \& \rightarrow S_a = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$\frac{S_c^2}{S_a^2} = \frac{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)^2}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)^2} = \frac{d^4}{D^4}$$

*Entonces:*

$$V_c^2 \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right) = 2 \left(\frac{P_a - P_c}{\rho_0}\right) \rightarrow V_c^2 = \frac{2 \left(\frac{P_a - P_c}{\rho_0}\right)}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}$$

Y llamando  $d$  = diámetro del orificio en metros

$D$  = diámetro interior de la tubería aguas arriba, en metros

$$V_c = \sqrt{\frac{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}}$$

y llamando  $\beta$  a la relación de diámetros  $\beta = d/D$ , resulta:

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}}$$

y llamando  $E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$  coeficiente de velocidad de acercamiento resulta:

$$V_c = E \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}}$$

y el caudal en volumen será:

$$Q_v = S_c \cdot V_c = E \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}} \text{ m}^3/\text{s} = K \sqrt{\frac{h}{\rho_0}} \text{ m}^3/\text{s}$$

expresando  $d$  en m;  $h$ ,  $P_a$  y  $P_c$  en pascal y  $\rho_0$  en  $\text{kg/m}^3$ ; y siendo  $K$  una constante,  $d$  el diámetro del orificio y  $h$  la presión diferencial producida por el elemento.

Otra expresión es:

$$Q_v = K \sqrt{H}$$

en la que  $H$  es la diferencia de alturas de presión del fluido. Estas expresiones están limitadas a fluidos ideales incompresibles.

Las fórmulas anteriores son aproximadas. En la práctica se consideran factores de corrección que tienen en cuenta el reparto desigual de las velocidades, la contracción de la vena del fluido, las rugosidades de la tubería, el estado del líquido, del gas, del vapor, etc.

La fórmula anterior se afecta de un coeficiente adicional  $C$  llamado “coeficiente de descarga” con lo cual

$$Q_v = C \cdot E \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}}$$

Por otro lado, se encuentra que la relación

$$\alpha = \frac{Q_v}{\frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}}}$$

llamada “coeficiente de caudal” depende solo del número de Reynolds:

$$\text{Re}_D = \frac{V \cdot D}{\nu} \rightarrow o \rightarrow \text{Re}_d = \frac{V \cdot D}{\nu} \cdot \frac{1}{\beta}$$

con

V = Velocidad axial media del fluido aguas arriba

$\nu$  = Viscosidad cinemática del fluido

De aquí

$$C \cdot E = \alpha \rightarrow y \rightarrow C = \frac{\alpha}{E}$$

El flujo másico sería

$$Q_m = Q_v \cdot \rho_0 = C \cdot E \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2(P_a - P_c) \cdot \rho_0}$$

En el caso de un fluido compresible, su densidad varía en toda la sección de la vena ya que cambia la presión, la temperatura y el peso específico.

La expresión final que se obtiene es parecida a la de los fluidos incompresibles introduciendo un coeficiente experimental de expansión  $\xi$  para tener en cuenta la expansión ocurrida durante la aceleración del flujo. No depende del número de Reynolds y es función de la relación de presiones, de la relación de calores específicos para los fluidos compresibles y de la relación de secciones del elemento y la tubería.

La expresión final es:

$$Q_v = C \cdot E \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0}} \text{ m}^3/\text{s}$$

expresada en las mismas unidades que la ecuación correspondiente a los fluidos incompresibles.

O bien en caudal masa:

$$Q_m = C E \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2(P_a - P_c) \cdot \rho_0} \text{ kg/s}$$

Si las presiones  $P_a$  y  $P_c$  se expresan en bar ( $1 \text{ Pa} = 10^5 \text{ bar}$ ), y los diámetros  $D$  y  $d$  en mm, las expresiones anteriores cambian a:

$$Q_v = C \cdot E \varepsilon \frac{\pi d^2}{4 \cdot 106} \sqrt{2 \frac{P_a - P_c}{\rho_0} \cdot 10^5} \text{ m}^3/\text{s}$$

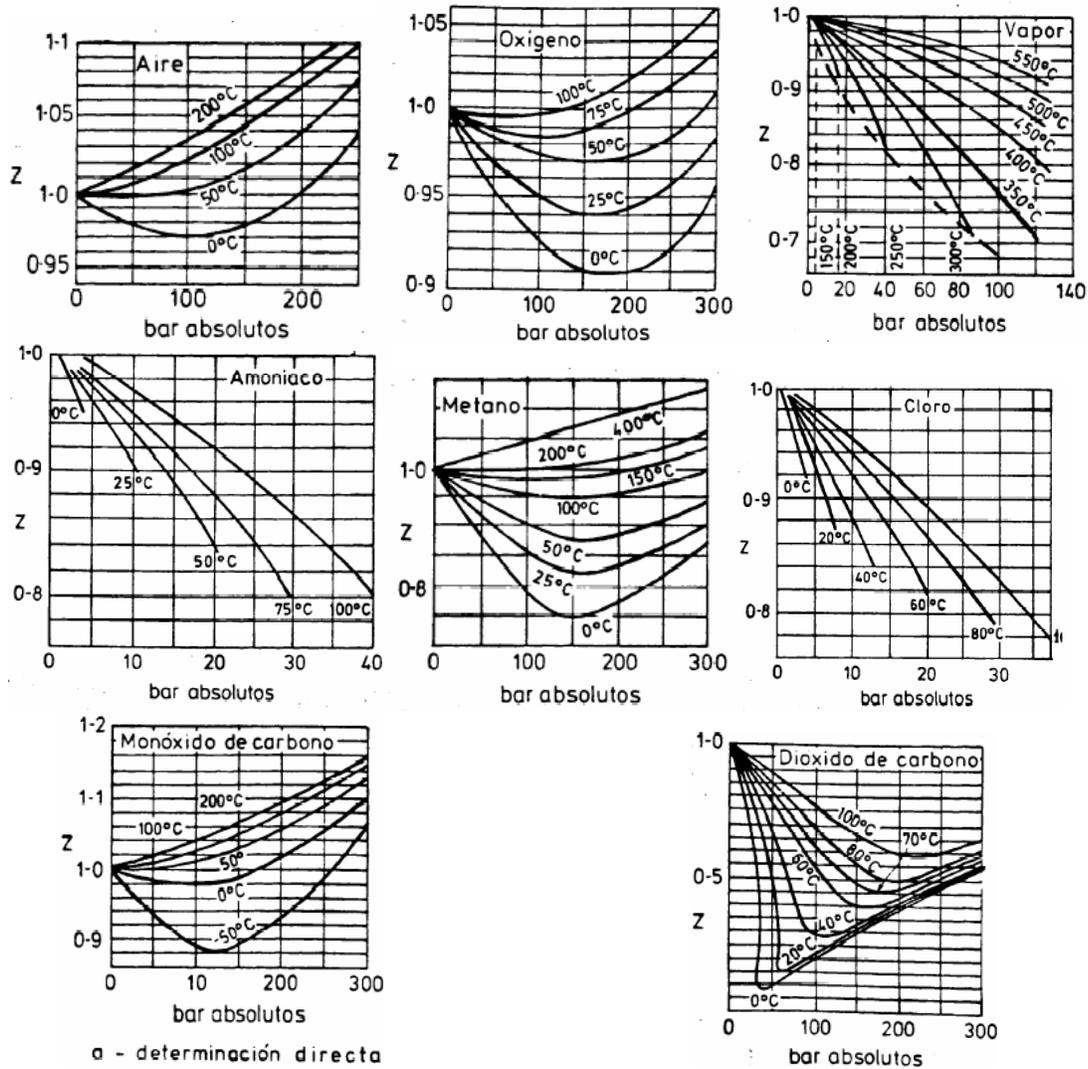
$$Q_m = C E \varepsilon \frac{\pi d^2}{4 \cdot 106} \sqrt{2(P_a - P_c) \cdot 10^5 \cdot \rho_0} \text{ kg/s}$$

En el caso de que la densidad se calcule a partir de la densidad en condiciones normales, la fórmula anterior para fluidos compresibles es aplicable a los gases que sigan la ley de los gases perfectos. En la práctica, la ley no es exactamente verdadera cuando la presiones de servicio superan los 10 bar, debiendo notar que lo es tanto menos cuanto mas se acerque el gas a las condiciones críticas.

De aquí que la densidad del gas se aparte de la teoría dependiendo de la temperatura y de la presión críticas. Las desviaciones están representadas por

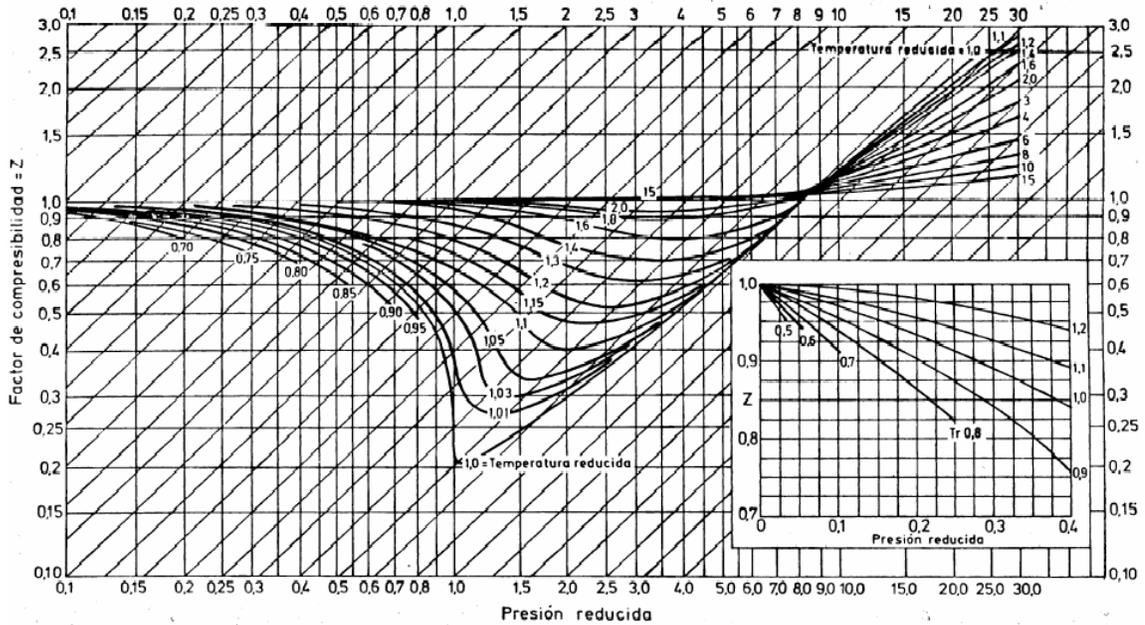
el coeficiente de compresibilidad  $Z$  que es la relación entre la densidad considerando el gas perfecto y densidad real.

Figura 39 Coeficientes de compresibilidad



a - Determinación directa

Figura 39 **Coefficientes de compresibilidad** (continuación)



b – Coeficientes de compresibilidad

En la figura 39a puede determinarse el valor de **Z** directamente.

Otra forma de determinar el factor de compresibilidad es emplear la ecuación de estado reducida de los gases. En esta ecuación se usan las magnitudes reducidas de presión y la temperatura ( $P_r$  y  $T_r$ ), es decir, los cocientes entre la magnitud en cuestión y la correspondiente magnitud crítica.

De este modo:

$$P_r = \frac{P}{P_c} \dots\dots T_r = \frac{T}{T_c}$$

y la ecuación reducida es:

$$P_r V_r = Z n R T_r$$

con  $V_r =$  volumen reducido  $= V/V_c$

$n =$  número de moles del gas

$R =$  constante general de los gases

Y Z es el coeficiente de compresibilidad que corrige directamente la densidad del gas.

La determinación de Z se logra empleando las curvas de la figura 39b.

Cuando el gas transporta vapor de agua sin contener partículas de agua, deja de ser puro y se considera húmedo. La densidad del gas húmedo se desvía del correspondiente al gas seco de acuerdo a con la formula siguiente:

$$\varpi_h = \frac{P_h - fP_v}{P_n} \cdot \frac{T_n}{T_h} \cdot \frac{1}{Z} \cdot \varpi_s + f\varpi_v$$

en la que:

$\omega_h$  = densidad del gas húmedo en condiciones de servicio en kg/m<sup>3</sup>

$\omega^s$  = densidad del gas seco en condiciones estándar kg/m<sup>3</sup>

$\omega_v$  = peso específico del vapor saturado en las condiciones de servicio en kg/m<sup>3</sup>

$P_h$  = presión absoluta del gas húmedo en bar

$P_n$  = presión absoluta del gas seco en condiciones estándar (1 atm)

$T_h$  = temperatura absoluta del gas húmedo (273° + tK)

$T_n$  = temperatura absoluta del gas seco en condiciones estándar 288 K

Z = coeficiente de compresibilidad

f = humedad relativa.

La adición de vapor de agua a una cantidad determinada de gas seco, influye en el caudal correspondiente a una presión diferencial dada de dos modos distintos: por un lado la densidad del gas húmedo cambia con relación a la del gas seco y por otro el gas medido es sólo una parte de la mezcla que pasa a través del elemento.

De aquí que el factor de corrección **N** para gas húmedo debe ser directamente proporcional al porcentaje del peso del gas seco con relación al peso de la mezcla y directamente proporcional a la raíz cuadrada del porcentaje de la densidades entre el gas húmedo y el seco (este último a la misma presión  $P_h$ ). Es decir, si  $\omega =$  tensión del vapor de agua  $= f P_r$ , y su densidad relativas es 0.624, resulta:

$$\frac{\text{densgas\_humedo}}{\text{densgas\_seco}} = \frac{\frac{P_h - \omega}{1.013} \cdot \frac{288}{273+t} \cdot \frac{1}{Z} \cdot \ell_g \cdot 1.293 + \frac{\omega}{1.013} \cdot \frac{1}{Z} \cdot 0.624 \cdot 1.293}{\frac{P_h}{1.013} \cdot \frac{288}{273+t} \cdot \frac{1}{Z} \cdot \ell_g \cdot 1.293} =$$

$$\frac{(P_h - \omega)\ell_g + 0.624\omega}{P_h \cdot \ell_g}$$

$$\frac{\text{peso\_del\_gas}}{\text{seco\_de\_la\_mezcla}} = \frac{\frac{P_h - \omega}{1.013} \cdot \frac{288}{273+t} \cdot \frac{1}{Z} \cdot \ell_g \cdot 1.293}{\text{peso\_total\_de la\_mezcla}} =$$

$$\frac{\frac{(P_h - \omega)\ell_g}{1.013} \cdot \frac{288}{273+t} \cdot \frac{1}{Z} \cdot 1.293 + \frac{\omega}{1.013} \cdot \frac{288}{273+t} \cdot \frac{1}{Z} \cdot 0.624 \cdot 1.293}{(P_h - \omega)\ell_g + 0.624\omega}$$

Luego:

$$N = \frac{(P_h - \omega)\ell_g}{(P_h - \omega)\ell_g + 0.624\omega} \sqrt{\frac{(P_h - \omega)\ell_g + 0.624\omega}{P_h \ell_g}} =$$

$$\sqrt{\frac{[(P_h - \omega)]^2 \ell_g}{P_h [(P_h - \omega)\ell_g + 0.624\omega]}} = \sqrt{\frac{P_h - \omega}{P_h + \frac{0.624 P_h \cdot \omega}{(P_h - \omega)\ell_g}}}$$

y llamando  $\frac{P_h}{\omega} = B$  resulta:

$$N = \sqrt{\frac{B-1}{B + \frac{0.624B}{(B-1)\ell_g}}}$$

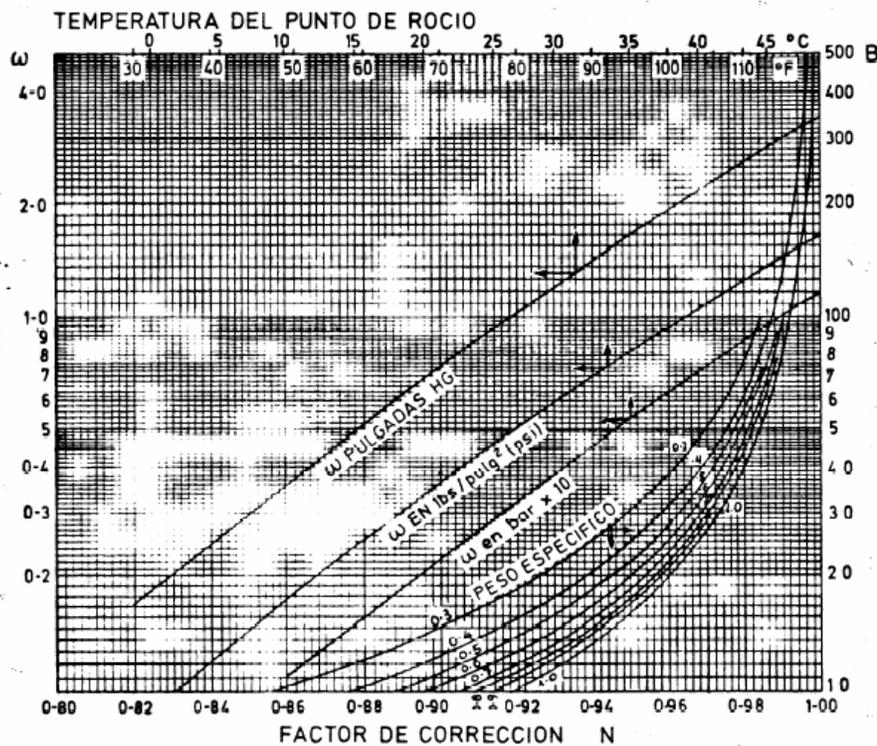
fórmula que da directamente el factor de corrección para gas húmedo en función de:

$$B = \frac{P_h}{\varpi} = \frac{\text{Presión absoluta del gas húmedo}}{\text{Presión del vapor de agua}}$$

$$\ell_g = \text{densidad relativa del gas seco.}$$

Esta fórmula está representada en la figura 40 en función de la temperatura de saturación del gas (punto de rocío) y de su peso específico.

Figura 40 Factor de corrección de humedad del gas



Pasos a seguir:

1. Del punto de rocío en la escala superior se determina la presión de vapor  $\omega$  mediante la línea de presiones correspondiente.
2. Se obtiene B como cociente de la presión absoluta del gas  $P_h$  y de  $\omega$ .
3. Con B en la escala vertical derecha y mediante las curvas de peso específico se lee en la escala inferior el factor N.

En ocasiones, el caudal del fluido es pulsante debido a la acción de bombas de pistón, compresores, ventiladores, etc. Como es lógico, es necesario amortiguarlo y ello se realiza en los instrumentos de medida mediante los dispositivos amortiguadores que disponen. La señal resultante obtenida es el promedio de la presión diferencial afectiva, de modo que el caudal leído en el instrumento es:

$$Q_m = C \sqrt{\frac{\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \dots + \Delta P_n}{n}}$$

Sin embargo, el caudal real promedio del instrumento leería realmente, si fuera capaz de trabajar sin amortiguación sería

$$Q_m' = C \left[ \frac{\sqrt{\Delta P_1} + \sqrt{\Delta P_2} + \sqrt{\Delta P_3} + \dots + \sqrt{\Delta P_n}}{n} \right]$$

El error  $Q_m - Q_m'$  es siempre positivo dependiendo del tipo de pulsaciones y del sistema de amortiguamiento. Para disminuir este error es necesario aumentar la pérdida de carga o bien el volumen que se encuentra entre la maquina, causa de las pulsaciones y el punto de medida del caudal.

En la selección de la presión diferencial que el elemento de medida (diafragma, tobera, tubo Venturi) producirá para el caudal máximo del fluido fijado en el cálculo se presentan dos factores importantes a considerar, la presión de la línea y la pérdida de carga máxima del elemento. Ambos factores influyen en el costo de funcionamiento de la instalación, es decir, en el costo necesario para que el fluido pase a través del elemento. Asimismo, la conveniencia de lograr un exactitud casi constante en todo el campo de medida de la presión diferencial es otro compromiso a satisfacer. Depende de la relación de diámetros y de la situación del elemento en la tubería conjuntamente con los tramos rectos y accesorios que ese encuentren aguas arriba y aguas abajo del elemento.

Los compromisos anteriores entre los varios factores expuestos se reflejan en la tabla VII (que relaciona la presión diferencial máxima que el elemento puede admitir con la presión estática en la línea) y en los gráficos de y longitudes rectas de tuberías y pérdidas de carga de las figuras 41 y 42.

**Tabla VII Presión diferencial máxima**

<i>Presión diferencial máxima</i>		<i>Presión estática mínima recomendada</i>	
<i>mm columna de agua</i>	<i>Pulg.columna de agua</i>	<i>mm y bar</i>	<i>pulgadas y psig</i>
64	2.538 (gases)	0 mm columna de agua	0" H <sub>2</sub> O ga
102	4.019 (gases)	127 mm columna de agua	5" H <sub>2</sub> O ga
127	5.000	178 mm columna de agua	7" H <sub>2</sub> O ga
162	6.370	254 mm columna de agua	10" H <sub>2</sub> O ga
254	10.000	508 mm columna de agua	20" H <sub>2</sub> O ga
256	10.099	508 mm columna de agua	20" H <sub>2</sub> O ga
406	16.000	889 mm columna de agua	35" H <sub>2</sub> O ga
508	20.000	0.14 bar	2 psig
552	21.722	0.14 bar	2 psig
635	25.000	0.7 bar	10 psig
644	25.360	0.7 bar	10 psig
874	34.429	0.7 bar	10 psig
1270	50.000	1.4 bar	20 psig
1386	54.562	1.7 bar	25 psig
1453	57.210	2.5 bar	35 psig
2196	86.479	3.2 bar	45 psig
2540	100.00	4.2 bar	60 psig
3270	128.73	4.2 bar	60 psig
3481	137.05	4.9 bar	70 psig
5080	200.00	7 bar	100 psig
5518	217.23	7 bar	100 psig
5813	228.86	7 bar	100 psig
7620	300.00	9.8 bar	140 psig
8744	344.26	10.5 bar	150 psig
10160	400.00	12.6 bar	180 psig
12700	500.00	15.5 bar	220 psig
15240	600.00	18.3 bar	260 psig
17780	700.00	21.1 bar	300 psig
20320	800.00	23.9 bar	340 psig
22860	900.00	26.7 bar	380 psig
25400	1000.00	29.5 bar	420 psig

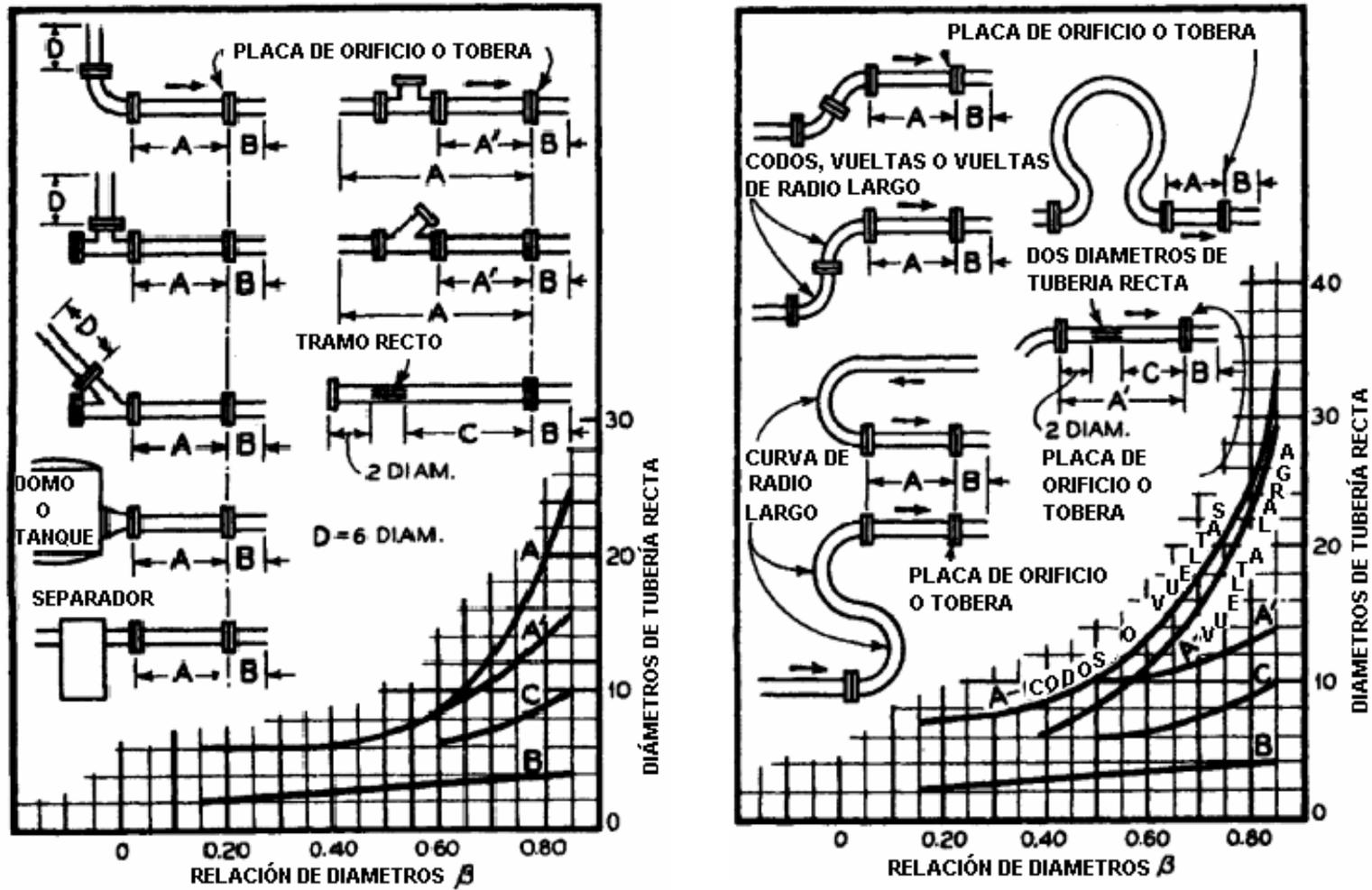
Hay que señalar que en la medida de caudales de líquidos se emplea normalmente una presión diferencial de 2500 mm columna de agua (100" columna de agua). La instalación de los elementos de presión diferencial requiere que se respeten unas distancias de tramos rectos de la tubería, antes y después del elemento. En la figura 41 pueden verse estas normas generales en las cuales se señalan en abscisas la relación de diámetros d/D (diámetro interior del elemento a diámetro de tubería) y en ordenadas la distancia expresada en diámetros de tubería.

Figura 41 Tramos rectos de tubería para la instalación del elemento

Primer accesorio aguas arriba	Distancia entre el medidor y el primer accesorio (L1)												Distancia entre accesorios (aguas arriba) (L2)	
	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	$\beta$ 0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	$\beta$ 0,2 a 0,8
Curva de 90° o T	10	10	10 0,5	12 0,5	14 0,5	14 1,0	14 1,5	16 2,5	18 3,0	22 4,0	28 4,0	36 4,5	46	14 14
Dos o más curvas de 90° (radio D) en el mismo plano	14	14	16 1,5	16 1,5	18 1,5	18 1,5	20 2,5	22 2,5	26 3,0	32 4,5	36 4,5	42 4,5	50	18 18
Dos o más curvas de 90° (radio D) en diferentes planos	34	34	34 0,5	36 0,5	36 0,5	38 0,5	40 8,5	44 12,5	48 17,5	54 23,5	62 27,5	70 29,5	80	31 31
Reductor 2D a D en una longitud de 3D Venturi 3D a D en 3,5D	5	5	5	5 1,5	5 2,5	5 4,5	6 5,5	8 6,5	9 8,5	11 9,5	14 10,5	22 11,5	30	7 7
Expansión 0,5D a D en una longitud de 1,5D Venturi 0,75D a D en D	16	16	16 1,5	16 1,5	16 1,5	17 2,5	18 2,5	20 3,5	22 3,5	25 4,5	30 5,5	38 6,5	54	15 15
Válvula de globo (totalmente abierta)	18	18	18	18	20	20	22	24	26	28	32	36	44	16
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	12	12	12 1,5	12 2,5	12 2,5	12 3,5	12 3,5	14 4,5	14 4,5	16 4,5	20 5,5	24 5,5	30	10 10
Reducción simétrica abrupta de 2D a D	30	30	30	30	30	30	30 30	30 30	30 30	30 30	30 30	30 30	30	15 15
Tanque	30	30	30 30	30 30	30 30	30 30	30 30	30 30	30 30	30 30	30 30	30 30	30	30-L <sub>U1</sub> 30-L <sub>U1</sub>

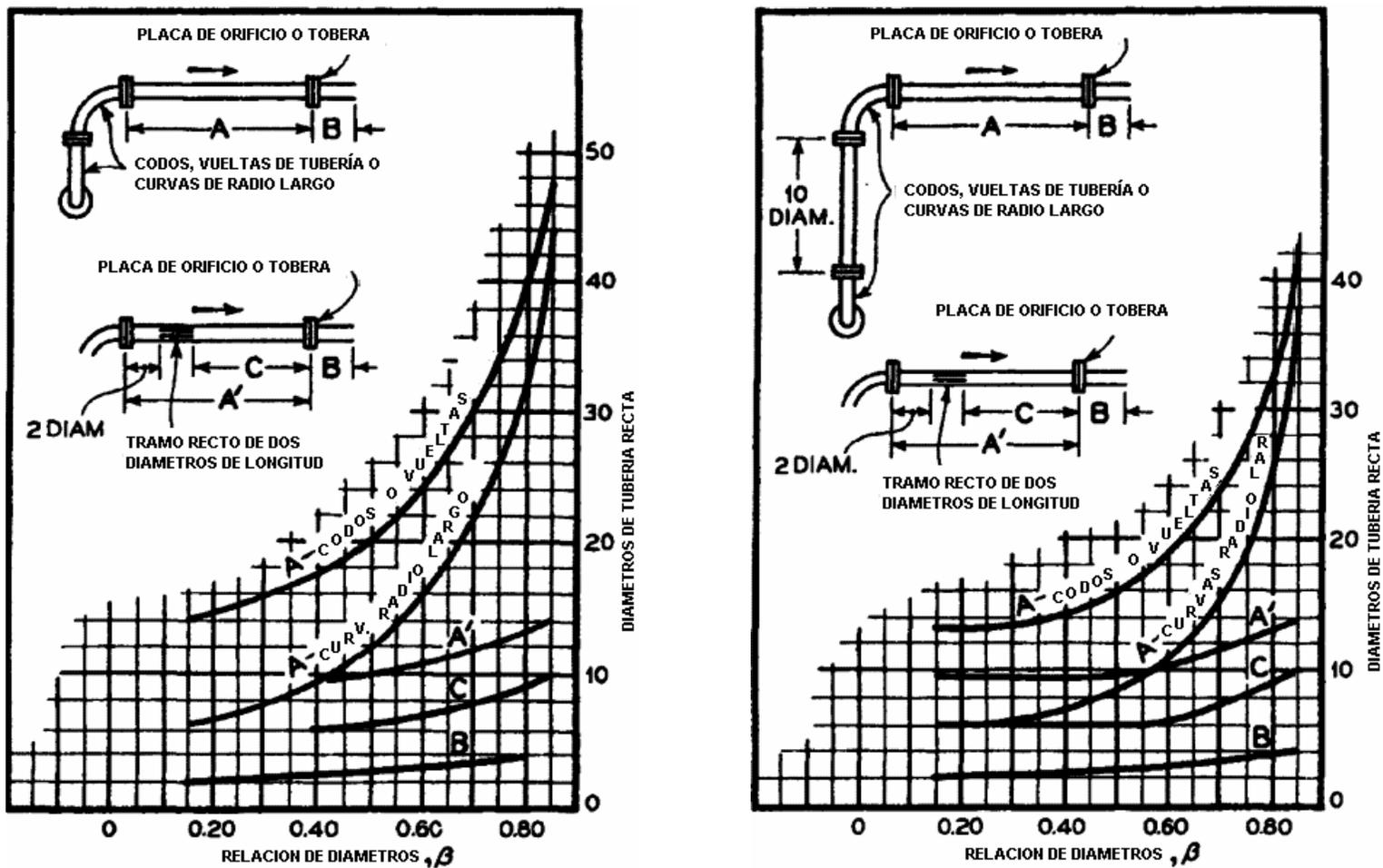
La primera fila corresponde a placa-orificio y tobera. La segunda fila corresponde a tubo Venturi. Las longitudes están expresadas en múltiplos del diámetro D.

Figura 42 Recomendaciones ASME para instalación de elementos de presión diferencial.



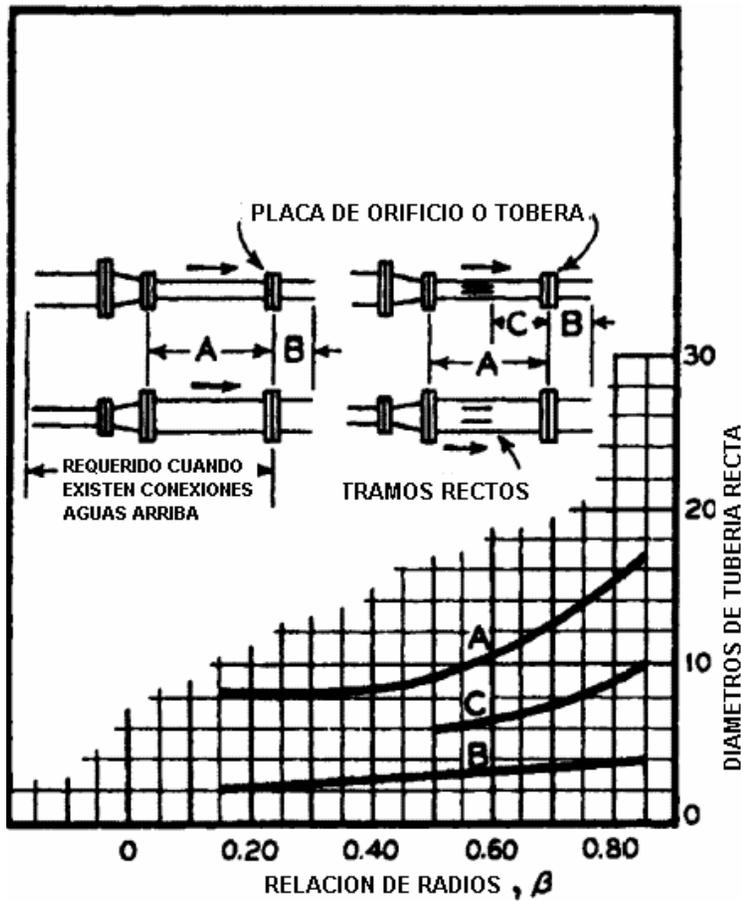
a. – Nótese que todas las conexiones y accesorios están en el mismo plano.

Figura 42 Recomendaciones ASME para instalación de elementos de presión diferencial (cont.)

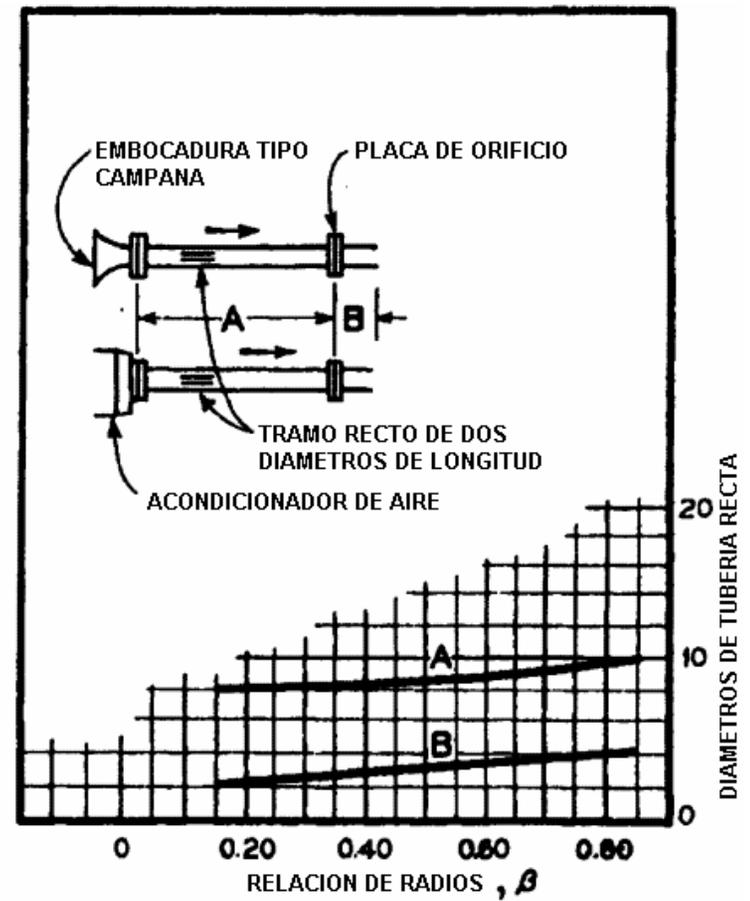


b. Nótese que todas las conexiones y accesorios están en diferente plano.

Figura 42 Recomendaciones ASME para instalación de elementos de presión diferencial (cont.)

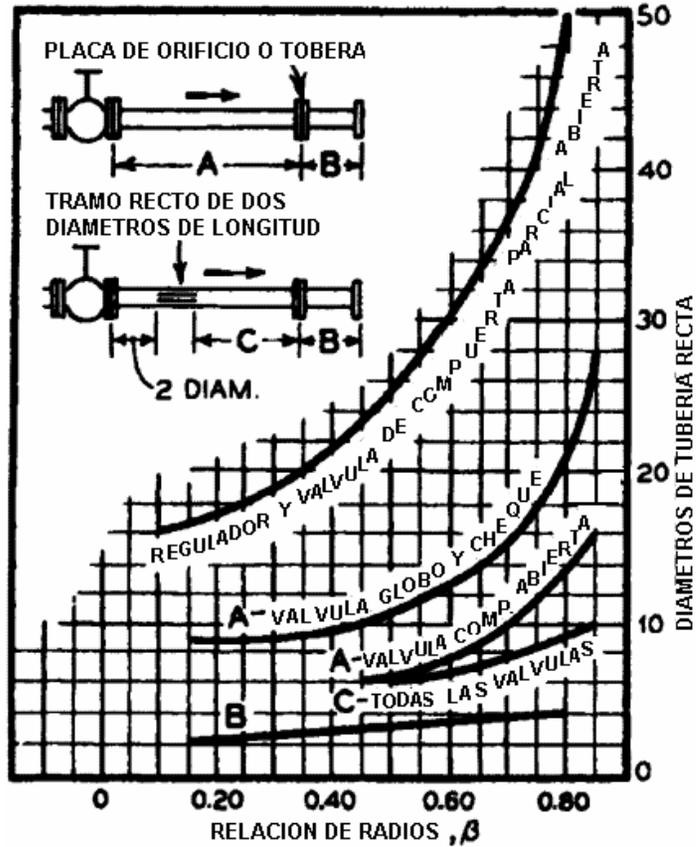


c. Con reductores y expansores

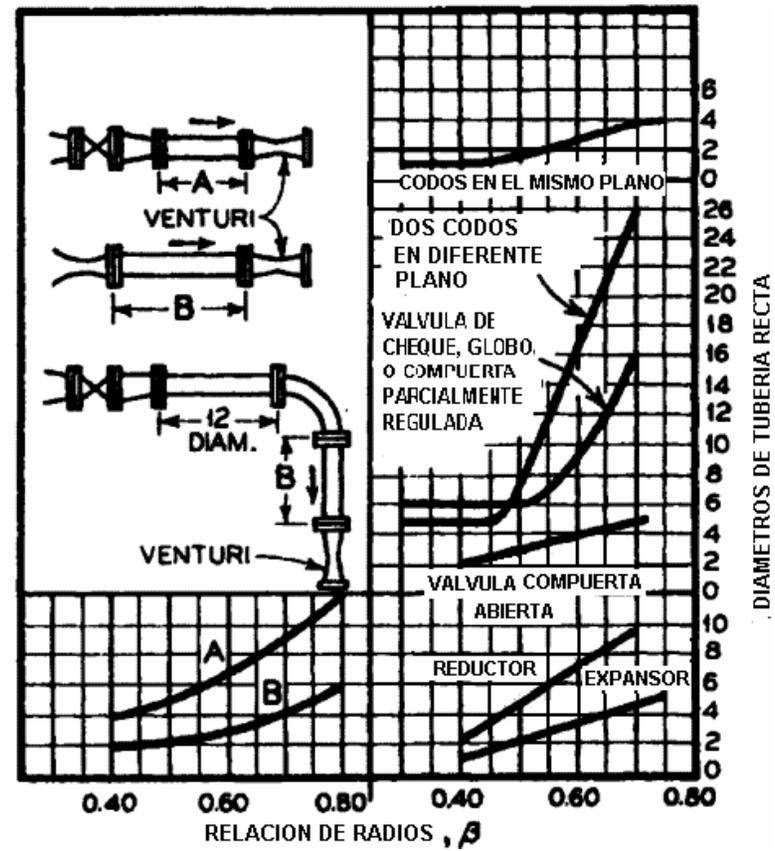


d. Con tomas abiertas a la atmósfera

Figura 42 Recomendaciones ASME para instalación de elementos de presión diferencial (cont.)



e. Con válvulas y reguladores.

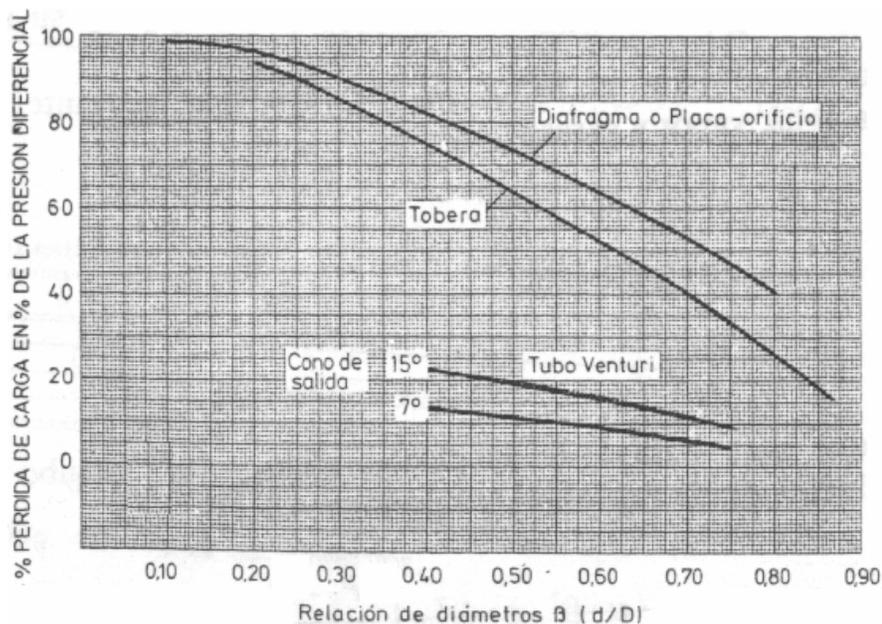


g. Aplicación para Tubos Venturi

En la figura 42 se muestran las recomendaciones ASME para la instalación de placas de orificio, toberas y tubos Venturi.

Por otro lado, los elementos de presión diferencial absorben una pérdida de carga que depende de la relación de diámetros  $d/D$  y que es una fracción de la presión diferencial que el elemento crea.

Figura 43 **Pérdida de carga de los elementos de presión diferencial**



En la figura 43 puede verse el porcentaje de presión diferencial absorbida pudiendo apreciarse que el orden de pérdida de carga de mayor a menor es placa de orificio, tobera, tubo Venturi.

### 3.1.2. Elementos de presión diferencial

Se estima que actualmente, al menos un 75% de los medidores industriales en uso son dispositivos de presión diferencial, siendo el más popular la placa de orificio.

Se sabe que cualquier restricción de fluido produce una caída de presión después de esta, lo cual crea una diferencia de presión antes y después de la restricción. Esta diferencia de presión tiene relación con la velocidad del fluido y se puede determinar aplicando el Teorema de Bernoulli (como se vio anteriormente); y sabiendo la velocidad del fluido y el área por donde esta pasando se puede determinar el caudal.

Los medidores de flujo de presión diferencial se caracterizan por la siguientes ventajas y desventajas:

#### *Ventajas*

- Su sencillez de construcción.
- Su funcionamiento se comprende con facilidad.
- No son caros, particularmente si se instalan en grandes tuberías y se comparan con otros medidores.
- Pueden utilizarse para la mayoría de los fluidos; y
- Hay abundantes publicaciones sobre sus diferentes usos.

#### *Desventajas*

- La amplitud del campo de medida es menor que para la mayoría de los otros tipos de medidores.
- Pueden producir caídas de presión significativas.
- La señal de salida no es lineal con el caudal.
- Deben respetarse unos tramos rectos de tubería aguas arriba y aguas abajo del medidor que, según el trazado de la tubería y los accesorios existentes, pueden ser grandes.

- Pueden producirse efectos de envejecimiento, es decir, acumulación de depósitos o la erosión de las aristas vivas.
- La precisión suele ser menor que la de medidores más modernos, especialmente si, como es habitual, el medidor se entrega sin calibrar.

### **3.1.3. Placa de orificio**

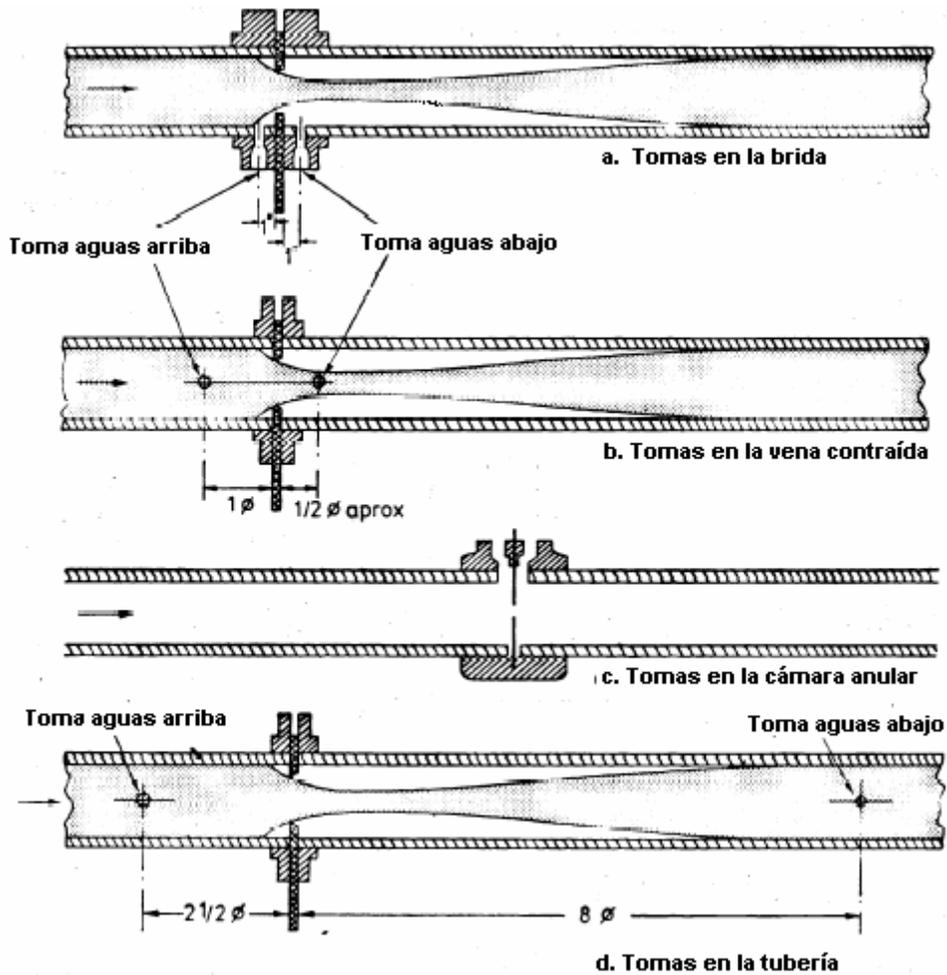
La placa de orificio o diafragma consiste en una placa perforada que se instala en la tubería, el orificio que posee es una abertura cilíndrica o prismática a través de la cual fluye el fluido. El orificio es normalizado (ISO 5167-1980), la característica de este borde es que el chorro que éste genera no toca en su salida de nuevo la pared del orificio. El caudal se puede determinar por medio de las lecturas de presión diferenciales. Dos tomas conectadas en la parte anterior y posterior de la placa captan esta presión diferencial, la cual es proporcional al cuadrado del caudal.

La disposición de las tomas se pueden observar con más claridad en la figura 44.

Tomas en la brida (*flange taps*) (figura 44 a). Es bastante utilizada por que su instalación es cómoda ya que las tomas están taladradas en las bridas que soportan la placa y situadas a 1" de distancia de la misma.

Tomas en la vena contraída (*vena contracta taps*) (figura 44 b). La toma posterior esta situada en un punto donde la vena alcanza su diámetro mas pequeño, lo cual depende de la razón de diámetros y se presenta aproximadamente a  $\frac{1}{2}$  diámetro de la tubería. La toma anterior esta situada a un diámetro de la tubería.

Figura 44 Disposición de las tomas de presión diferencial



Tomas radiales (*radius taps*). Son parecidas a las tomas de vena contraída, pero fijando siempre las tomas anterior y posterior a  $1$  y  $1/2$  diámetros de la tubería, respectivamente.

Tomas en la cámara anular (*corner taps*) (figura 44 c). Las tomas están situadas inmediatamente antes y después del diafragma y requieren el empleo de una cámara anular especial. Se emplean mucho en Europa.

Tomas en la tubería (*pipe taps*). (figura 44 d). Las tomas anterior y posterior están situadas a  $2 \frac{1}{2}$  y 8 diámetros, respectivamente. Se emplean cuando se desea aumentar el intervalo de medida de un medidor de caudal dado. La situación de las tomas está en un lugar menos sensible a la medida.

El orificio de la placa, como se muestra en la figura 45, puede ser: concéntrico, excéntrico y segmentado.

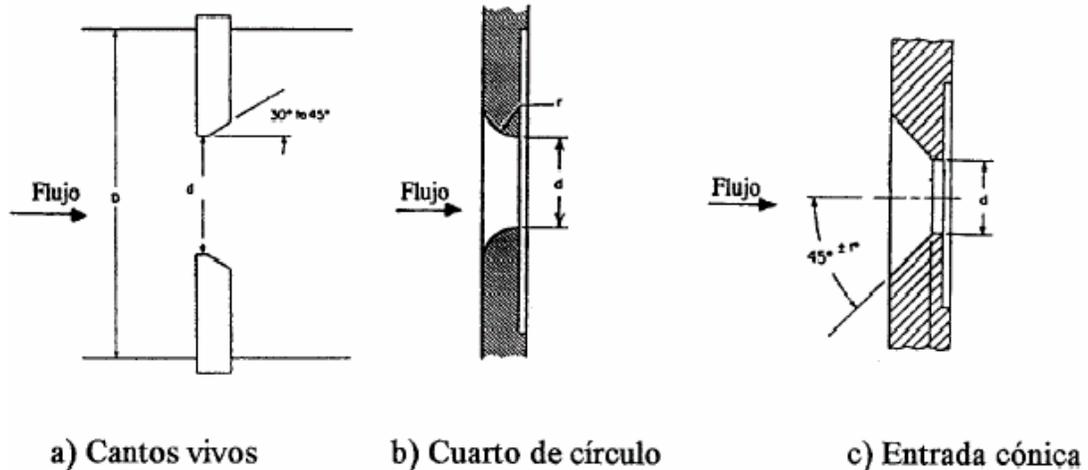
La placa concéntrica sirve para líquidos. La excéntrica para los gases donde los cambios de presión implican condensación. Cuando los fluidos contienen un alto porcentaje de gases disueltos. Segmentada, partículas en suspensión implican turbulencias que limpiarán (para que no se aglomeren partículas) el lado de alta presión evitando errores en la medición.

Figura 45 **Placa de orificio**



Con el fin de evitar arrastres de sólidos o gases que pueda llevar el fluido, la placa incorpora un orificio de purga como se menciona anteriormente. Entre los diversos perfiles de orificio que se utilizan, según se muestra en la figura 46, se pueden destacar los siguientes: de cantos vivos, de cuarto de círculo y de entrada cónica. La precisión obtenida con la placa de orificio es del orden de  $\pm 1$  a  $\pm 2$  %.

Figura 46 Orificios de purga



#### 3.1.4. Medidor tipo cuña (*Wedge*)

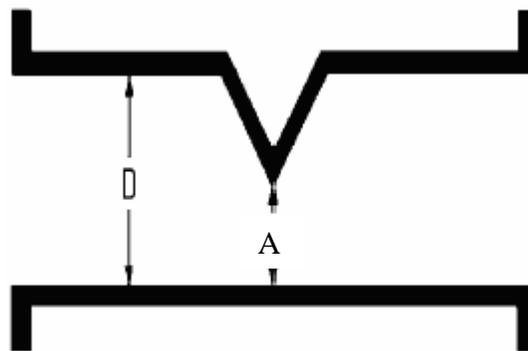
Los elementos de flujo *WEDGE* utilizan restricciones en forma "V" para producir una relación de raíz cuadrada entre la presión diferencial y el flujo volumétrico. Los elementos son diseñados para servicio limpio o sucio y se fabrican en varios materiales, tamaños de tubería y clasificaciones de presión. La presión diferencial es medida por un transmisor de presión diferencial. El medidor tipo *WEDGE* tiene varias conexiones para transmisores de presión diferencial neumáticos o electrónicos u otros dispositivos de detección de presión diferencial.

La presión diferencial medida puede ser relacionada con el flujo volumétrico usando una curva de calibración para el elemento específico o una ecuación de flujo estándar para todos los elementos de flujo *WEDGE*.

La razón *WEDGE* se define como  $A/D$  donde  $A$  representa la altura de la entrada *WEDGE* y  $D$  es el diámetro nominal del tubo.

La restricción del *WEDGE* es de forma en "V" al ángulo óptimo para tener las mejores características cuando se miden los fluidos viscosos. El elemento maneja flujo con números Reynolds de la tubería entre 500 (en la zona de flujo laminar) y varios millones. Esto hace que el elemento sea bien adecuado para la medición del flujo de gas o vapor.

Figura 47 **Sección transversal del elemento *WEDGE***



El área de flujo no restringido del *Wedgometer* es determinada por diferentes razones de Altura contra Diámetro definiendo así el rango diferencial producido con respecto al rango de caudal. Esta razón  $A/D$  es igual a la altura de la apertura debajo de la restricción dividida entre el diámetro interior de la tubería.

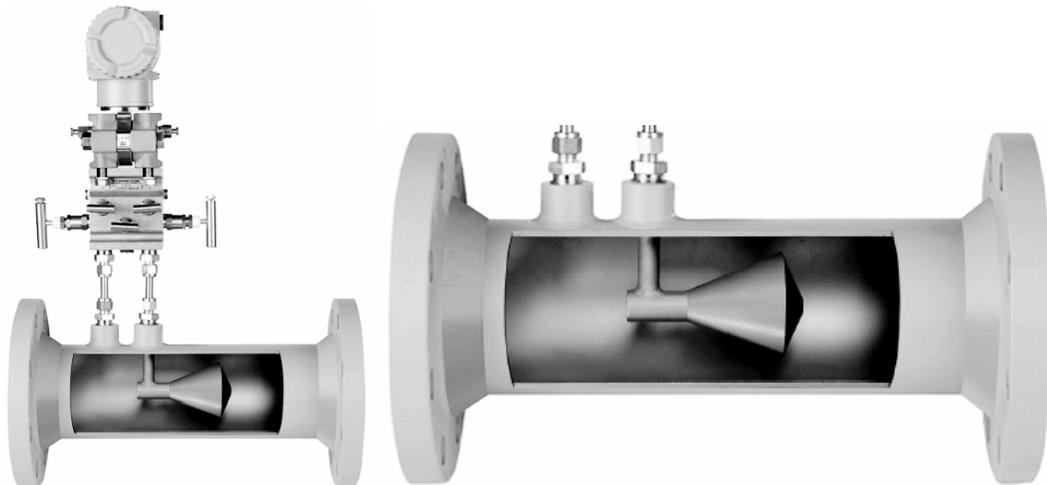
La exactitud de los elementos no calibrados podría llegar hasta 5% del caudal, según el tipo de elemento, el tamaño de la tubería y la razón *WEDGE* ( $A/D$ ). Se presentarán errores adicionales si la densidad del fluido de proceso es diferente del valor de diseño. Las condiciones inadecuadas de la tubería corriente arriba del elemento también provocarán errores.

### 3.1.5. Medidor tipo cono

Como se ha visto, cuando un área transversal de un conducto cerrado (o tubo) se reduce por un cambio en el diámetro o por el uso del elemento que produce la presión diferencial, la velocidad de los fluidos que pasan por el conducto se incrementa en el área de las paredes (ecuación de continuidad). La presión disminuye (ecuación de Bernoulli) y se genera una presión diferencial a lo largo de la reducción o el elemento.

La presión diferencial (DP, por sus siglas en inglés) y la velocidad de flujo ( $Q_v$ ) mantienen una relación proporcional tal que  $Q_v \propto K \cdot \sqrt{\Delta P / \rho}$  y es por esta relación universal que se puede determinar la velocidad de flujo.

Figura 48 **Medidor tipo cono**



Mientras que otros medidores de flujo por diferencia de presión se basan en este principio, el Medidor Tipo Cono genera una presión diferencial creando una reducción de área mediante un elemento de flujo de forma cónica ubicado en la línea central de la sección transversal de un tubo, lo cual difiere de la reducción que se logra mediante un orificio o pared de tubería de menor diámetro.

Las ecuaciones de flujo de presión diferencial para todos los elementos de flujo tipo cono son las siguientes:

Cociente de área efectiva (  $A_t$  ), Cociente Beta ( $\beta$ ) y velocidad de aproximación (E), expresado como:

$$A_t = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \quad \beta = \frac{\sqrt{D^2 - d^2}}{D} \quad E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

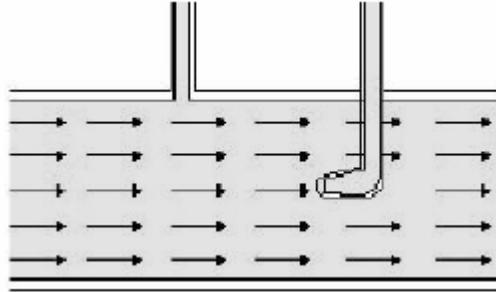
El Medidor Tipo Cono brinda niveles de precisión de hasta  $\pm 0.5\%$  de la lectura (número de Reynolds y según el fluido) con una repetibilidad nominal de 0.1% bajo diversas condiciones y modos de funcionamiento. El medidor puede funcionar con reducciones de caudal de hasta 10-1. Estas especificaciones cumplen con los requerimientos de rendimiento para la transferencia de custodia en las mediciones de transmisión de gas con volúmenes de hasta 36 pulgadas.

### 3.1.6. Tubo Pitot

El tubo Pitot mide la diferencia entre la presión total y la presión estática, o sea, la presión dinámica, la cual es proporcional al cuadrado de la velocidad.

El tubo de Pitot es quizá la forma más antigua de medir la presión diferencial y también de conocer la velocidad de circulación de un fluido en una tubería. Consiste en un pequeño tubo con la entrada orientada en contra del sentido de la corriente del fluido. La velocidad del fluido en la entrada del tubo se hace nula, al ser un punto de estancamiento, convirtiendo su energía cinética en energía de presión, lo que da lugar a un aumento de presión dentro del tubo de Pitot.

Figura 49 **Tubo Pitot**



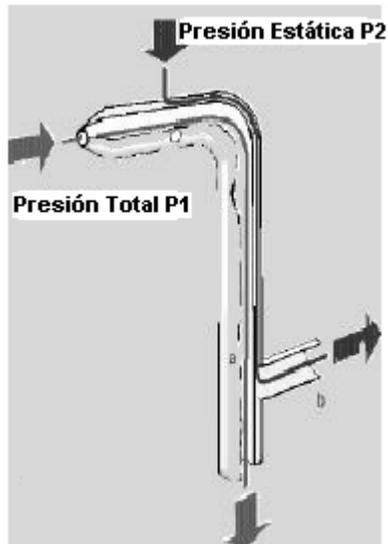
Los tubos de Pitot son instrumentos sencillos, económicos y disponibles en un amplio margen de tamaños. Si se utilizan adecuadamente pueden conseguirse precisiones moderadas y, aunque su uso habitual sea para la medida de la velocidad del aire, se usan también, con la ayuda de una técnica de integración, para indicar el caudal total en grandes conductos y, prácticamente, con cualquier fluido.

Entre las características principales del tubo Pitot encontramos:

- Mide la velocidad en un punto.
- Sus ventajas son la escasa caída de presión y bajo precio, siendo por ello una buena elección para tuberías de gran diámetro y para gases limpios.
- Consiste en un tubo de pequeño diámetro que se opone al flujo, con lo que la velocidad en su extremo mojado es nula.

La forma en que funciona el tubo de Pitot puede describirse así (Figura 50), el orificio del tubo de Pitot toma la presión total y la conduce a la conexión en la sonda de presión. La presión estática pura se toma desde una parte lateral y se conduce a la conexión. La presión diferencial resultante es una presión dinámica que depende de la velocidad y que es analizada e indicada.

Figura 50 **Funcionamiento del tubo Pitot**



De la figura 50 obtenemos la ecuación correspondiente al tubo Pitot:

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

En la que:

$P_2$  = presión de impacto total absoluta en el punto donde el líquido anula su velocidad;

$P_1$  = presión estática absoluta en el fluido;

$\rho$  = densidad;

$V_1$  = velocidad del fluido en el eje de impacto.

El tubo Pitot es sensible a las variaciones en la distribución de velocidades en la sección de la tubería, de aquí que en su empleo es esencial que el flujo sea laminar disponiéndolo en un tramo recto de tubería. La máxima exactitud en la medida se consigue efectuando varias medidas en puntos determinados y promediando las raíces cuadradas de las velocidades medidas.

Su precisión es del orden de 1.5 a 4%, y se emplea normalmente para la medición de grandes caudales de fluidos limpios con una baja caída de presión.

### 3.1.7. Tubo Pitot Promedio o Annubar

El tubo *Annubar* (Figura 51) es una innovación del tubo Pitot y consta de dos tubos, el de presión total y el de presión estática. El tubo que mide la presión total está situado a lo largo de un diámetro transversal de la tubería y consta de varios orificios de posición crítica determinada por computador, que cubren cada uno la presión total en un anillo de área transversal de la tubería. Estos anillos tienen áreas iguales. En tuberías de tamaño mayor que 1" se dispone en el interior del tubo otro que promedia las presiones obtenidas en los orificios.

El tubo que mide la presión estática se encuentra detrás del de presión total con su orificio en el centro de la tubería y aguas debajo de la misma.

Figura 51 **Tubo Annubar**



El tubo Annubar es de mayor precisión que el tubo Pitot, del orden de 1%, tiene una baja pérdida de carga y se emplea para la medida de pequeños o grandes caudales de líquidos y de gases.

### 3.1.8. Toberas

Las toberas son medidores de flujo que consisten en un orificio con una garganta, no tan extensa como la de un tubo Venturi, pero con una forma más prolongada que la de un orificio sencillo. En general, su caída de presión es mucho mayor que la de un tubo Venturi pero menor que un medidor de orificio.

En general, los cálculos en una tobera son exactamente los mismos que en un tubo Venturi, salvo que los coeficientes varían, principalmente por la morfología de la garganta, debido a que si es más tendiente a un orificio el coeficiente será menos cercano a 1, que si la garganta es alargada.

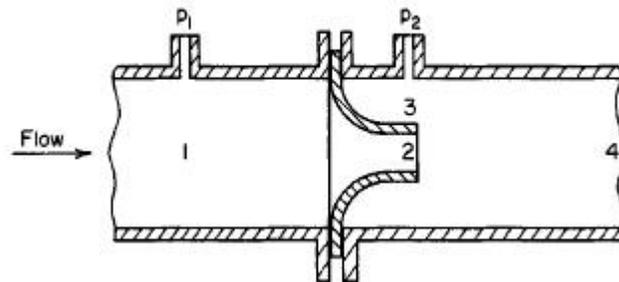
Asimismo, el número de Reynolds juega un papel importante en la determinación del coeficiente C, debido a que la caída de presión depende también de la velocidad y el régimen de flujo. Así mismo el factor de la relación de los radios ( $\beta$ ) afecta, puesto que mientras menor sea el orificio, la caída de presión permanente será mucho mayor.

En general, se debe de hacer notar, que el uso de las toberas es prácticamente exclusivo para el uso en líquidos, no obstante, en ocasiones se utilizan para gases, pero utilizando un líquido para medir la diferencia de presión.

Las toberas se sitúan en tuberías con dos tomas, una anterior y otra en el centro de la sección más pequeña (figura 52). La tobera permite caudales 60% superiores a los de la placa de orificio en las mismas condiciones de servicio. Su pérdida de carga es de 30 a 80 % de la presión diferencial. Puede emplearse para fluidos que arrastren sólidos en pequeña cantidad siempre que no sean abrasivos. El coste de la tobera es de 8 a 16 veces el de un diafragma y su precisión es del orden de  $\pm 0.95$  a  $\pm 1.5\%$ .

Las toberas se calculan por medio de la ecuación de Bernoulli, según la norma ISO 5167-1980, y básicamente existen de tipo ISA 1932 y Tobera ASME de radio largo.

Figura 52 **Tobera**



### 3.1.9. Tubo Venturi

Este consta en sus extremos de dos entradas en las cuales existe una boquilla, el fluido pasa por la boquilla, generalmente se hace de una sola pieza fundida y tiene específicamente los siguientes elementos:

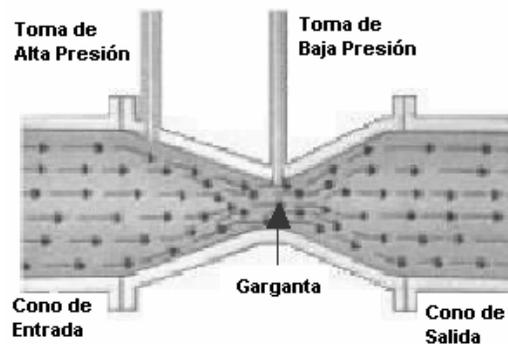
- Una sección aguas arriba, de igual diámetro que la tubería y provista de un anillo de bronce con una serie de aberturas piezométricas para medir la presión estática en esa sección.
- Una sección cónica convergente; una garganta cilíndrica provista también de un anillo piezométrico de bronce.
- Una sección cónica con una divergencia gradual hasta alcanzar el diámetro original de la tubería. Los anillos piezométricos se conectan a uno y otro extremo, respectivamente, de un manómetro diferencial.

El tamaño del tubo de Venturi se especifica mediante el diámetro de la tubería en la cual se va a utilizar y el diámetro de la garganta; por ejemplo, un tubo de Venturi de 6" x 4" se ajusta a una tubería de 6" y tiene una garganta de 4" de diámetro.

Para que se obtengan resultados precisos, el tubo de Venturi debe estar precedido por una longitud de al menos 10 veces el diámetro de la tubería.

Al escurrir el fluido de la tubería a la garganta, la velocidad aumenta notablemente y, en consecuencia, la presión disminuye; el gasto transportado por la tubería en el caso de un flujo incompresible, está en función de la lectura en el manómetro.

Figura 53 **Tubo Venturi**



Aplicando la ecuación de Bernoulli a un Tubo Venturi como el que se muestra en la figura 53, que se emplea como se ha señalado para medir la velocidad o el caudal en una tubería.

El tubo Venturi tiene distintas aplicaciones, se utiliza en los motores como parte importante de los carburadores, se utiliza en sistemas de propulsión.

Otras características:

- Se utiliza cuando es importante limitar la caída de presión.
- Consiste en un estrechamiento gradual cónico y una descarga con salida también suave.
- Se usa para fluidos sucios y ligeramente contaminados.

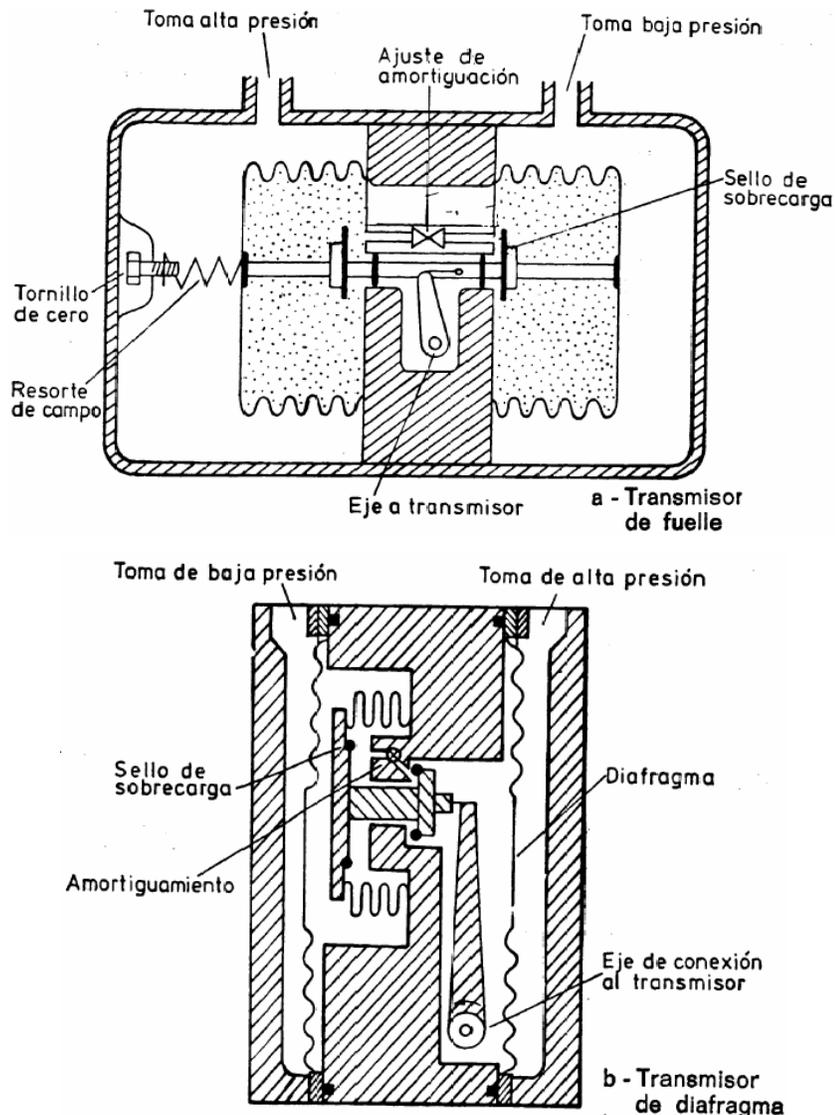
El tubo Venturi permite la medición de caudales 60% superiores a los de la placa de orificio en las mismas condiciones de servicio y con una pérdida de carga de solo 10 a 20% de la presión diferencial. Posee una gran precisión y permite el paso de fluidos con un porcentaje relativamente grande de sólidos, si bien, los sólidos abrasivos influyen en su forma afectando la exactitud de la medida. El coste del tubo Venturi es elevado, del orden de 20 veces el de un diafragma y su precisión es del orden de  $\pm 0.75\%$ .

### **3.2. Elemento transmisor de flujo**

#### **3.2.1. Transmisores de fuelle y de diafragma**

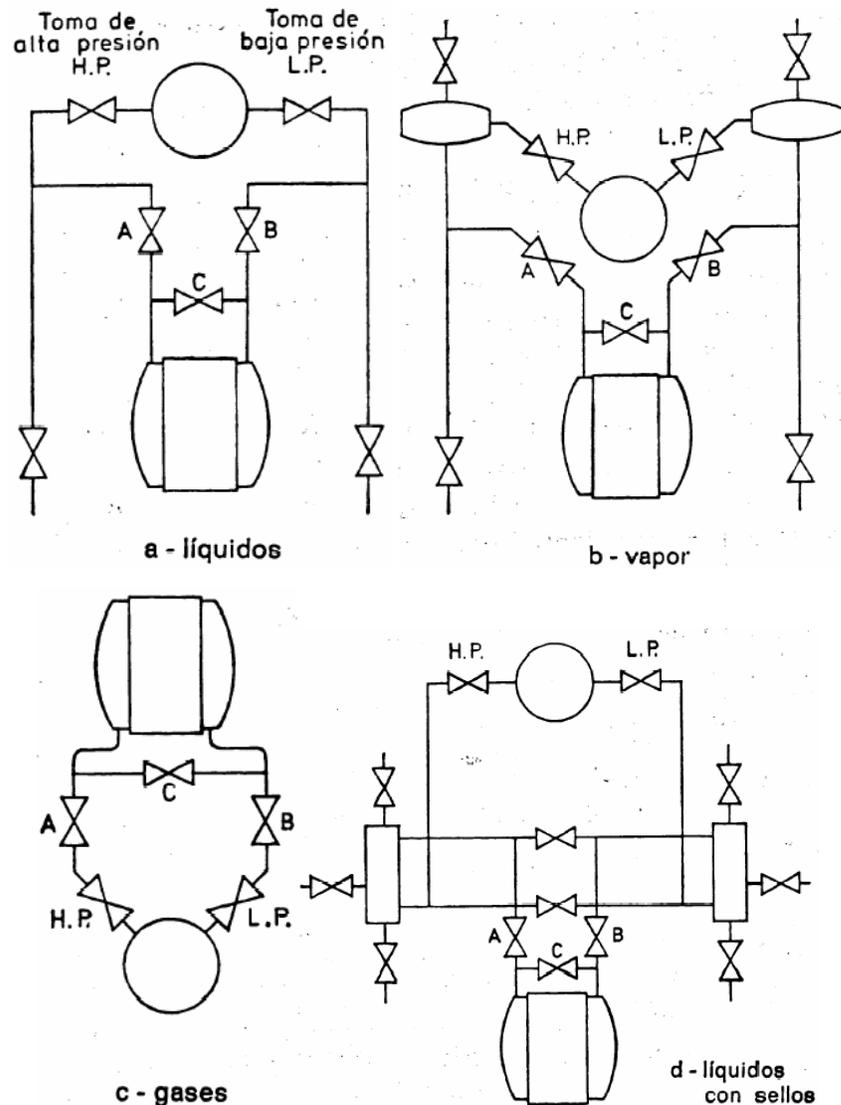
Los transmisores de fuelle (figura 54 a) contienen dos cámaras para la alta y baja presión. La alta presión comprime el fuelle correspondiente, arrastrando la palanca de unión, el cable y un eje exterior, cuyo movimiento actúa sobre el transductor neumático o eléctrico. Un muelle de margen permite disponer de varias gamas de presión diferencial. La protección contra sobrecargas se asegura por medio de dos anillos de sello que cierran herméticamente el paso del líquido de relleno de un fuelle al otro, e impiden su destrucción ante una maniobra incorrecta. Otro accesorio es una válvula contra pulsaciones de caudal que restringe el paso del líquido de llenado entre los fuelles.

Figura 54 Transmisores de presión diferencial



Los trasmisores de diafragma (figura 54 b) se diferencian de los anteriores en que la separación entre las dos cámaras se efectúa mediante diafragmas, en lugar de fuelles, con lo cual el desplazamiento volumétrico es casi nulo. El cuerpo de estos transmisores suele ser de acero al carbono, acero inoxidable o aluminio, el fuelle o diafragma de acero inoxidable 316 (disponible también en *Monel*, *Hastelloy C*, Teflón en inoxidable o Kel – F en *monel*) y el liquido de llenado silicona.

Figura 55 **Conexiones entre el elemento y el transmisor de caudal**



La conexiones entre las tomas del diafragma y el convertidor de presión diferencial deben ser adecuadas al fluido a medir (figura 55). Con el objeto de aislar el instrumento se prevén tres válvulas que constituyen lo que se denomina un *manifold*; este tiene una doble misión, aislar el instrumento del proceso para su mantenimiento e igualar las presiones en las dos cámaras del instrumento en la puesta en marcha de la instalación.

Si la tubería está sometida a una vibración fuerte, es aconsejable unir el instrumento al sistema mediante conexiones flexibles adecuadas a las condiciones de trabajo de la instalación.

Si el fluido es corrosivo o viscoso, o bien condensa o se evapora, o bien congela o solidifica, es necesario utilizar sistemas de sello que aíslen el instrumento del proceso. Un caso típico es la medida de caudal de vapor en la que el fluido de sello es el propio condensado del vapor. En otros casos suele emplearse una mezcla de 50% de glicerina y 50% de agua.

Hay que señalar que, en la medida de caudal de vapor con transmisores de fuelle, es preciso utilizar cámaras de condensación para compensar los cambios de volumen en las cámaras de fuelle al variar el caudal. Esto no es necesario en los transmisores de diafragma por ser el desplazamiento volumétrico despreciable.

Cuando los problemas de condensación o de evaporación del fluido o de obturación del elemento no pueden resolverse de otra forma, es necesario utilizar un sistema de purga que introduzca un fluido de purga en la zona de medida del elemento diferencial. Es un sistema que solo debe utilizarse cuando sea estrictamente necesario debido a la necesidad de un mantenimiento frecuente o a la posible generación de falsas presiones diferenciales.

El fluido de purga debe ser limpio, no debe reaccionar con el fluido medido, debe circular a un caudal bajo y constante ( $0.6 \text{ cm}^3/\text{s}$  para líquidos y  $60 \text{ cm}^3/\text{s}$  para gas) y debe disponerse un sistema que impida la entrada del fluido del proceso en caso de un fallo en la purga.

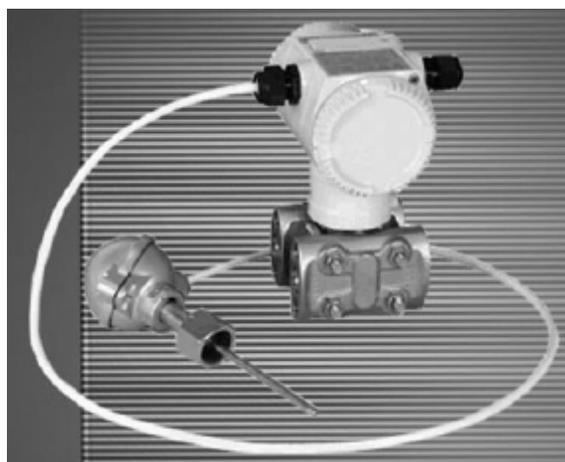
Si el fluido de proceso es susceptible de condensación, solidificación o congelación a las temperaturas ambiente mas bajas que puedan encontrarse en las tuberías, es necesario disponer un sistema de calentamiento, en general con vapor a baja presión que impida este fenómeno. El suministro de vapor debe ser seguro e independiente para que en caso necesario siga calentando durante los períodos de paro de la planta. La calefacción eléctrica, si bien no está muy extendida es cómoda y admite un buen control de temperatura.

### **3.2.2. Transmisores de presión multivariable**

Tradicionalmente, el cálculo de flujo por computadora o en un sistema de control distribuido (DCS, por sus siglas en inglés) calcula el flujo a partir de una señal de presión diferencial utilizando una ecuación de flujo másico simplificada para líquidos o compensado la medición por temperatura y presión estática (presión de la línea).

Hoy existe una nueva generación de transmisores que miden la presión diferencial y la absoluta con un sensor simple y la temperatura del proceso con un detector de resistencia / temperatura de 100 ohm (RTD).

**Figura 56 Transmisor de presión Multivariable**



Gracias a esta capacidad fue posible llevar un cálculo dinámico completamente compensado de flujo másico o volumétrico para gases, vapor o líquidos.

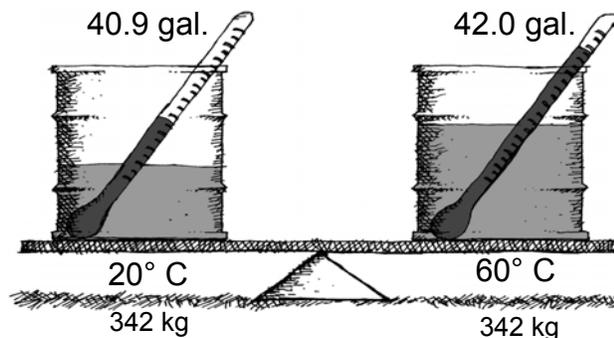
El cálculo de flujo con un transmisor multivariable incluye la compensación por presión y temperatura que se convierte en una variable mas compleja al adicionar el coeficiente de descarga, expansión térmica, numero de Reynolds y factor de compresibilidad.

El Transmisor Multivariable puede reducir el costo del cálculo de caudal compensado hasta un 60%. Esta reducción del costo permite su instalación en lugares donde antes no justificaba por su elevado costo. Puede tener una exactitud base de 0.75% o 0.04%, dependiendo de su aplicación. Soporta alta presión estática (41 Mpa, 6000psi) para plantas de generación, cañerías y producción de gas y petróleo Su rango diferencial puede ser tan bajo como 0.05 kPa, 0.2inH<sub>2</sub>O. Actualmente los podemos encontrar con diferentes protocolos de comunicación: HART, Profibus PA, Modbus con capacidad de actualización.

### 3.2.2.1. Compensación por temperatura en la medición de flujo

En principio se debe tomar en cuenta que los líquidos cambian su densidad de acuerdo a las variaciones de temperatura.

Figura 57 Efecto de la temperatura en el volúmen de los líquidos

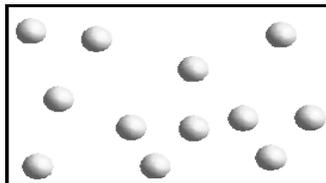


Como se puede observar en la figura 57 el volumen del líquido cambia de acuerdo a los cambios de temperatura, por lo que la presión diferencial que se mide también cambia, entonces debe compensarse este cambio debido a la temperatura y la ley de conservación de la masa.

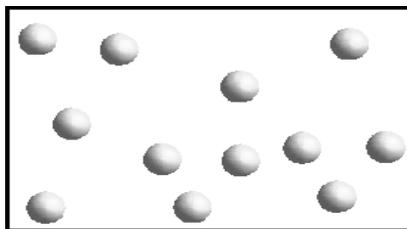
### 3.2.2.2. Compensación por presión en la medición de flujo

Para este caso se debe tomar como principio que una masa de gas constante puede ocupar diversos volúmenes, y que esto depende de la presión a la que este se encuentre, por que los gases son compresibles, esto se explica mejor con los gráficos de la figura 58.

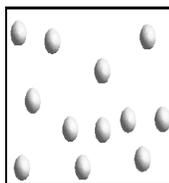
Figura 58 **Efecto de la temperatura y la presión en los gases**



La misma masa de gas a presión atmosférica y  $T = 68^{\circ}\text{F}$  ( $20^{\circ}\text{C}$ )



La misma masa de gas a presión atmosférica y  $T = 140^{\circ}\text{F}$  ( $60^{\circ}\text{C}$ )



La misma masa de gas a 29 PSI (2 Bar) presión estática y  $T = 20^{\circ}\text{C}$

Por estas razones se debe compensar la presión y la temperatura en los casos que se mida el flujo másico de gas o vapor y líquidos compresibles.

### 3.2.2.3. Impacto de la compensación en la medición de flujo

En la medición de flujo másico, se debe compensar la variación de densidad debido a la variación de presión y temperatura, por lo tanto, además de medir la presión diferencial, habrá que medir la presión estática y la temperatura. Por ejemplo, para la medida de un gas se podría utilizar la siguiente ecuación

$$Q_m = k \sqrt{\frac{\Delta P \cdot P_s}{T}}$$

Donde:

$P_s$  = presión estática

$T$  = temperatura.

En aquellos casos en los cuales se desee realizar una compensación dinámica del flujo habrá que tener en cuenta que el factor  $k$  de la ecuación no es un valor constante. A través de la medida de la presión diferencial, presión estática y temperatura se pueden obtener los distintos parámetros que influyen en  $k$ , como son la densidad, viscosidad, número de Reynolds, coeficiente de descarga, factor de expansión térmica y factor de expansión del gas.

La compensación dinámica del flujo másico se basa en las normas AGA 3 y en la norma EN ISO 5167:

$$Q_m \approx C \cdot E_v \cdot Y_1 \cdot d^2 \sqrt{dp \cdot \rho}$$

$Q_m$  = flujo másico

$C$  = coeficiente de descarga

$E_v$  = factor aproximado de velocidad

$Y_1$  = factor de expansión de gas

$d$  = diámetro del agujero

$dp$  = presión diferencial

$\rho$  = densidad del fluido

## **Coeficiente de Descarga**

Esta definido como el valor de flujo verdadero dividido dentro de un valor de flujo teórico y corrige la ecuación teórica por la influencia del perfil de velocidad (número de Reynolds), se asume que no existen perdidas de energía entre las tomas y la localización de la toma de presión. Este depende del elemento primario de medición de flujo, el radio  $\beta$  y el número de Reynolds que se torna dependiente de la viscosidad, la densidad y la velocidad del fluido como también el diámetro de la tubería de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\nu}$$

Donde:

v = velocidad

D= diámetro interior de la tubería

$\rho$  = densidad del fluido

$\nu$  = viscosidad del fluido

La compensación dinámica para el coeficiente de descarga provee una alta precisión para elementos primarios como placas de orificio, tubos Venturi o Toberas.

## **Factor de expansión de gas**

Este corrige las diferencias de densidad entre las tomas de presión debidas a la expansión de los fluidos compresibles. Esta no se aplica a líquidos los cuales son no compresibles.

Este factor depende de Beta, el exponente isentrópico, la presión diferencial y la presión estática del fluido por medio de la siguiente ecuación:

Para elementos de orificio:

$$Y_1 = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{dp}{p \cdot \kappa}$$

Para toberas:

$$Y_1 = \left[ \left( \frac{\kappa \left( \frac{dp}{p} \right)^{\frac{2}{\kappa}}}{\kappa - 1} \right) \left( \frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \left( \frac{dp}{p} \right)^{\frac{2}{\kappa}}} \right) \left( \frac{1 - \left( \frac{dp}{p} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{1 - \left( \frac{dp}{p} \right)} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

$\beta$  = beta

dp = presión diferencial

p = presión estática

$\kappa$  = exponente isentrópico

### Factor aproximado de velocidad

Esta depende del valor de beta como se define en la siguiente ecuación:

$$E_v = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

El parámetro Beta depende de el diámetro del orificio y el diámetro de la tubería los que son función de la temperatura. El material de la tubería de proceso y del elemento primario se expande o contrae con los cambios de temperatura del fluido de proceso. El coeficiente de expansión térmica es dependiente de el material de la tubería y del elemento primario por lo que se utilizan para calcular el cambio en los diámetros. Esto asegura buena precisión para aplicaciones de baja o alta temperatura.

## **Densidad de los fluidos**

Esta es un efecto directo de cálculo del flujo que se debe compensar por cambio de temperatura y/o presión como sigue:

- Gases en función de P y T por la ecuación de la ley de los gases.
- Vapor sobrecalentado en función de P y T basado en las tablas de vapor.
- Vapor saturado en función de P y T basado en las tablas de vapor.
- Líquidos en función de la temperatura.

Es normal que los transmisores multivariables traen predefinida esta compensación de acuerdo al tipo de elemento primario.

### **3.3. Medición de nivel de líquidos**

La medición del nivel de líquidos puede ser realizada a través de un transmisor de presión diferencial o uno de presión manométrica. Esto depende de si el tanque es abierto a la atmósfera o si este es cerrado.

#### **3.3.1. Medidor manométrico**

Consiste en un transmisor de presión manométrico conectado directamente a la parte inferior del tanque a través de una válvula de cierre para mantenimiento, y un recipiente de decantación con una válvula de purga. Este instrumento mide la presión debida a la altura de líquido  $h$  que existe entre el nivel del tanque y el eje del instrumento.

La fórmula para realizar el cálculo sería:

$$h = (h') (GS)$$

Donde:

$h$  = altura de líquido, H<sub>2</sub>O

$h'$  = Altura real del líquido, pulgadas

GS = Gravedad Específica (adimensional) del fluido en el tanque.

La gravedad específica es el peso relativo de una unidad de volumen de líquido comparada con una unidad del mismo volumen de agua. La gasolina por ejemplo, tiene una gravedad específica aproximada de 0.8, por lo tanto un litro de gasolina pesa el 80% de lo que pesa un litro de agua.

Consecuentemente cuando se especifica la columna de líquido en el tanque, es necesario conocer la gravedad específica del mismo.

La medida está limitada a tanques abiertos y el nivel se ve influido por las variaciones de densidad del líquido.

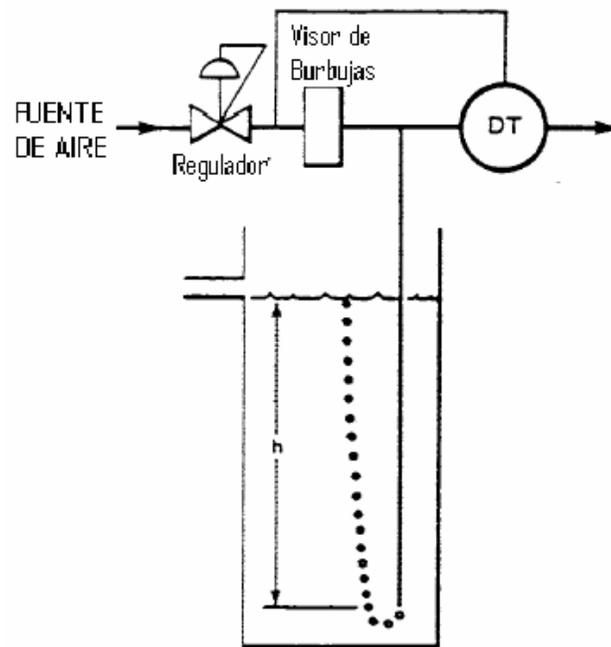
### **3.3.2. Medidor tipo membrana**

Este tipo de medidor utiliza una membrana conectada con un tubo y este con el instrumento receptor. La fuerza ejercida por la columna de líquido sobre el área de la membrana comprime el aire interno a una presión igual a la ejercida por la columna de líquido. El volumen del aire es relativamente grande por lo cual el sistema está limitado a distancias no mayores de unos quince metros debido a la compresibilidad del aire. Como antes, la presión máxima que el líquido ejercerá es 0.098  $h_p$  bar. El instrumento es delicado ya que cualquier fuga del aire contenido en el diafragma destruiría la calibración del instrumento.

### 3.3.3. Medidor de tipo Burbujeo

Otra forma de medir el nivel de líquidos en un tanque es por medio del tubo de burbujas. En la figura 59 se muestra este método que puede ser aplicado a tanques abiertos o cerrados.

Figura 59 Medidor de tipo burbujeo



Se debe mantener una presión constante de aire o gas que debe ser liberado dentro del fluido que este contiene a través de un tubo. Conforme el nivel cambie, la presión medida será una medida directa del nivel del mismo. La ventaja es que solamente el material del tubo esta expuesta al proceso, no directamente el transmisor, que puede colocarse hasta distancias de 200 m. Debe tomarse en cuenta que el proceso no debe ser afectado por las burbujas.

### 3.3.4. Medidor de presión diferencial

Consiste en un diafragma en contacto con el líquido del tanque, que mide la presión hidrostática en un punto del fondo del tanque. En un tanque abierto esta presión es proporcional a la altura del líquido en ese punto y a su peso específico.

Es decir

$$P = H\rho g$$

en la que:

P = presión

H = altura del líquido sobre el instrumento

$\rho$  = densidad del líquido

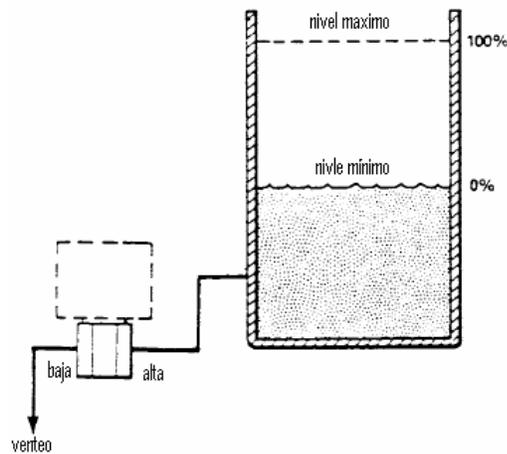
$g = 9.8 \text{ m/s}^2$

En el tipo más utilizado, el diafragma está fijado en una brida que se monta rasante al tanque para permitir sin dificultades la medida del nivel de fluidos, tales como pasta de papel y líquidos con sólidos en suspensión, pudiendo ser de montaje saliente para que el diafragma engrase completamente con las paredes interiores del tanque tal como ocurre en el caso de líquidos extremadamente viscosos en que no puede admitirse ningún recodo.

Los medidores de presión diferencial pueden aplicarse para medir niveles de líquidos dentro de tanques abiertos o cerrados, así como el nivel de interfase, e incluso la variación de la densidad del mismo.

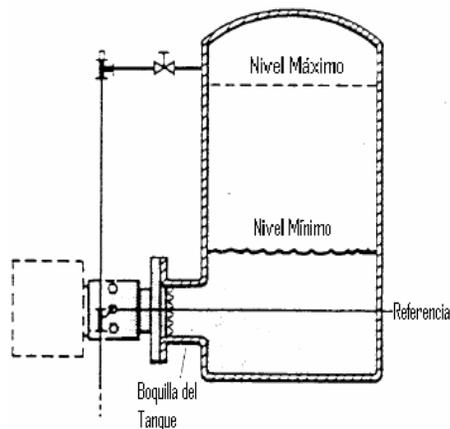
La medición de líquidos en tanques abiertos se llama así, por que el tanque está abierto hacia la atmósfera. En la figura 60 se muestra una aplicación de tanque abierto, cualquier cambio en la presión atmosférica afecta la presión que ejerce el fluido contenido en el tanque.

Figura 60 **Medición de nivel en tanque abierto**



En este tipo de medición de nivel, el lado de baja del transmisor de presión diferencial mide la presión atmosférica, esto cancela el efecto que ésta causa en el fluido contenido en el tanque. El lado de alta se debe conectar a el tanque y de este modo se mide el nivel actual del fluido contenido en el tanque.

Figura 61 **Medición de nivel en tanque cerrado**



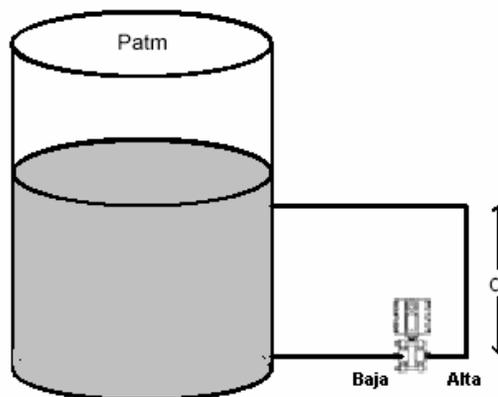
La medición de nivel en un tanque cerrado se llama así por que el tanque esta cerrado a la atmósfera. Durante el proceso de vaciado o llenado del tanque, la presión podría ir de positiva hacia el vacío. Este cambio tendría efecto directo en la medición del nivel, a menos que fuera compensada.

La compensación se hace fácilmente conectando la pierna de baja presión del transmisor de presión diferencial en la parte alta del tanque.

### 3.4. Medición de la densidad de un fluido

Para realizar la medida de la densidad de un fluido contenido en un tanque donde el nivel de dicho fluido es variable, se puede recurrir a la medida de la presión diferencial como se muestra en la figura 62.

Figura 62 **Medición de la densidad de un fluido con un solo transmisor**



Por lo tanto, si conocemos la gravedad y la distancia  $d$ , y se mide la diferencia de presión entre las dos tomas, podemos conocer la densidad del fluido (siempre y cuando sea constante y el fluido no estratifique). Es evidente que el nivel dentro del depósito siempre debe estar por encima de la toma superior para que la medida de densidad sea fiable.

Otra posibilidad es utilizar dos transmisores de presión manométrica en lugar de utilizar un transmisor de presión diferencial según se muestra en la Figura 63.

Con esta disposición, el transmisor de la parte inferior puede ser usado para ambas medidas, nivel y junto con el transmisor de la parte superior se obtendría la densidad.

Los pasos a seguir serían:

- Calibrar el transmisor inferior para medir desde su toma hasta el máximo nivel con la densidad máxima.
- Calibrar el transmisor superior para medir desde su toma hasta el máximo nivel con la densidad máxima.
- Determinar la densidad mediante

$$\rho = \frac{\textit{lectura del transmisor inf.} - \textit{lectura del transmisor sup.}}{d \cdot g}$$

Una vez la densidad fue determinada se puede obtener el valor mediante:

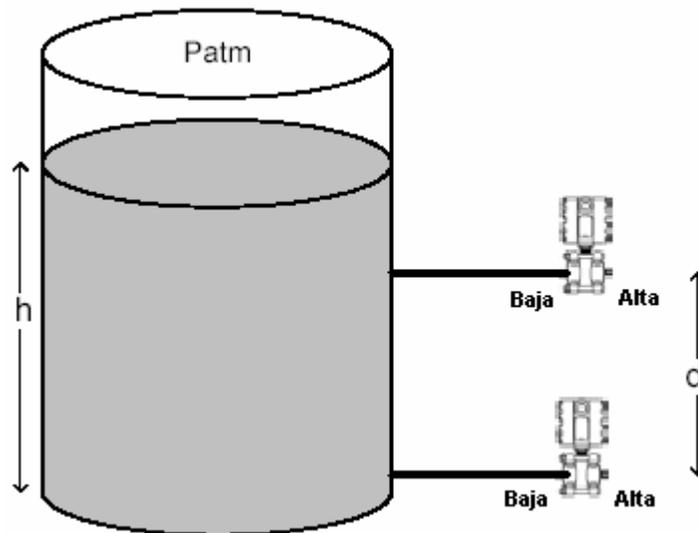
$$h = \frac{\textit{lectura del transmisor inferior}}{\rho \cdot g}$$

Los cálculos expuestos en este apartado son válidos siempre y cuando se trabaje con depósitos abiertos, de forma que la parte superior del tanque esté a presión atmosférica.

En aquellos casos en que el depósito sea cerrado y la presión por encima del fluido pueda ser negativa o positiva, se deberá hacer la compensación para la presión estática. Esta compensación se puede hacer fácilmente sustituyendo los transmisores de presión manométrica por transmisores de presión diferencial, de forma que una de las tomas de cada uno de los transmisores esté conectada a la parte superior del tanque.

Otra posibilidad para la compensación de la presión estática si se usa la configuración de la figura 63, es añadir un tercer transmisor de presión manométrica que mida la presión en la parte superior del tanque, de forma que a partir de las relaciones entre las salidas de los transmisores, se obtendrían los valores de densidad y nivel del fluido en el tanque.

Figura 63 **Medición de la densidad de un fluido por medio de dos transmisores**



## 4. CRITERIOS PARA SELECCIÓN DEL ELEMENTO PRIMARIO

Como se ha visto a lo largo de este documento, existe una gama muy amplia de aplicaciones para los transmisores de presión, pero lo fundamental es tener el criterio y el conocimiento para optimizar los recursos de estos equipos de acuerdo a cada aplicación. A continuación se explican en detalle los tipos de elementos primarios tomando en cuenta que el rango de presión de la aplicación rige desde el principio el diseño del transmisor.

### 4.1. Elementos primarios para la medición de presión

Figura 64 Tipos de sellos y diafragmas



Los elementos primarios son los que están en contacto directo con los procesos, y para la medición de presión, existe una amplia gama de éstos, ya que existen diversas maneras de conectar los equipos a los procesos, entre estas están las conexiones tipo *flange*, *waffer*, *tri-clamp*, roscadas, con *manifold*, por ejemplo (figura 64).

Las conexiones pueden presentarse en diversas variaciones como sellos extendidos, sellos remotos, o la combinación de sello remoto y extendido, sellos con recubrimientos especiales o *linig*, y diversos materiales para los diafragmas en base a la aplicación al igual que los fluidos de transmisión de la variable o fluidos de relleno, como se vera a continuación.

La mayoría de los fabricantes en el mercado ofrecen diversas combinaciones para transmisores ya sea de presión absoluta, manométrica o diferencial y en configuraciones como un sello remoto y uno integrado con el mismo o distinto fluido de rellenos, dos sellos remotos, un sello remoto extendido y uno integrado no extendido, sello remoto y sello integrado con diafragmas de diferente tamaño, en fin, uno puede especificar el equipo que mejor se adapte al requerimiento, inclusive para la aplicación mas crítica.

#### **4.1.1. Escogencia del tipo de fluidos de relleno según su aplicación**

Existen diversos tipos de fluidos de relleno o de transmisión de presión de acuerdo a las diversas aplicaciones que se pueden encontrar para los transmisores de presión, por ejemplo en la industria alimenticia, la industria química, petroquímica, etc., por lo que estos fluidos pueden clasificarse como: fluidos de usos general, fluidos para aplicaciones de alta temperatura, fluidos para aplicaciones de baja temperatura, fluidos para la industria sanitaria y alimenticia, fluidos para servicio con oxígeno y fluidos para aplicaciones especiales.

El tipo de fluido seleccionado puede limitar la temperatura a la que el transmisor trabaja correctamente, por esta razón los fluidos de relleno deben ser seleccionados de acuerdo a la temperatura de la aplicación.

El fluido de relleno más utilizado es el silicón, por que tiene buena estabilidad en un amplio rango de temperaturas: -40 a 200 °C. Otros fluidos que pueden ser seleccionados cuando su rango de temperatura sea compatible con la aplicación, de acuerdo a su característica de baja viscosidad y bajo factor de expansión térmica, particularmente para ser utilizados en aplicaciones con sellos remotos de capilares largos.

Para aplicaciones farmacéuticas o alimenticias, el fluido de relleno no debe ser toxico, para prevenir la contaminación del producto si llegara a romperse el diafragma, el fluido de relleno debe ser de tipo sanitario.

Otro caso especial es la aplicación de un transmisor para servicios de oxígeno, ya que el aceite de silicón puede incendiarse al momento de una fuga, por lo que debe seleccionarse un fluido inerte.

**Tabla VIII Características de los fluidos de relleno**

Fluido de Relleno (Aplicación)	Condiciones de Operación				Especificaciones a 25 °C (77 °F)		
	Tmax °C(°F) Pabs >	Pmin mbar Abs (psia)	Tmax Pmin	Tmin	Gravedad Especifica	Viscosidad cinemática (cSt)	Expansión Térmica (x10 <sup>-3</sup> / °C
Aceite de Silicón DC-200 (Propósito General)	200(390) 35 mbar	0.7 (0.01)	160 (320)	-40 (-40)	0.934	10	1.08
Aceite de Silicón AN-140 (Alta Temperatura)	380(716) 1 bar	0.7 (0.01)	300 (572)	-5 (+23)	1.07	40	0.64
Silicón Polimérico (Baja Temperatura)	100(212) 100 mbar	2 (0.03)	20 (68)	-100 (-148)	0.852	1.4	1
Aceite Vegetal TM20 (Sanitario)FDA	200(390) 1bar	130 (1.9)	150 (300)	-18 (0)	0.92	9.8	1.2
Glicerina Agua 70% (Sanitario)FDA	93(200) 1bar	1000 (14.5)	93 (200)	-7 (20)	1.08	2.2	0.36
Aceite Mineral 82 (Sanitario)FDA	200(390) 200mbar	33 (0.5)	40 (104)	-40 (-40)	0.84	26	1.04
Salden Inerte (Servicio de oxigeno)	160(320) 1bar	0.7 (0.01)	65 (150)	-18 (0)	1.82	9	1.1
Holocarbón Inerte4.2 (Servicio de oxigeno)	180(356) 400 mbar	4 (0.06)	70 (158)	-20 (-4)	1.87	6.3	0.864

La tabla VIII muestra las características de los distintos fluidos de relleno que pueden encontrarse comúnmente en el mercado.

#### **4.1.2. Escogencia del material del diafragma del elemento primario**

Uno de los factores mas importantes en la selección del material del diafragma es su resistencia a la corrosión, sin dejar por un lado la compatibilidad respecto a la aplicación. La corrosión es la destrucción gradual de un metal por causas químicas o electromecánicas.

Existen diversos materiales entre los que se pueden mencionar:

Acero Inoxidable 316 L:

Este es un material muy resistente a la corrosión y el estándar en la mayoría de los fabricantes, resiste bajas concentraciones de ácido nítrico y la mayoría de las soluciones salinas, con excepción de ácidos no oxidantes como Hidroclórico, Hidrofluórico, Sulfónico y Fosfórico. La resistencia del acero inoxidable 316L a las soluciones alcalinas, ácidos orgánicos y otras composiciones orgánicas depende de la temperatura. Concerniente a las sales, las sales haladas (fluorina, clorita, bromina yodina) pueden causarle picaduras severas y la falla del diafragma por corrosión.

Monel:

El Monel (67Ni-33Cu) tiene buena resistencia a temperatura ambiente a la mayoría de los ácidos no oxidantes, como el Hidrofluórico, Sulfónico y Fosfórico, y también a algunas sales no oxidantes. El níquel mejora la resistencia hacia los alcalinos.

El monel tiene la desventaja de permitir la permeación del hidrogeno por lo que no se recomienda para aplicaciones con altos contenidos de hidrógeno.

Hastelloy C:

El Hastelloy C. como el monel y el acero inoxidable permiten la permeación del hidrógeno, por lo que también debe ser descartado para aplicaciones con altas concentraciones de hidrógeno, pero se caracteriza por proveer una buena protección contra los alcalinos, ácidos orgánicos y otros compuestos orgánicos. Además permite mantener una buena condición frente a ácido fosfórico y algunas sales acidas como clorídeos de níquel y cobre. A temperaturas moderadas soporta ácido sulfúrico e hidrocloreídrico, en concentraciones mayores, en general tiene buena resistencia a la corrosión bajo condiciones atmosféricas.

Tantalo:

El tantalo esta diseñado para ser utilizado en aplicaciones corrosivas como por ejemplo para ácidos hidrocloreídrico, hidrobromico, hidrocloreídrico hirviendo, nítrico, fosfórico y sulfúrico. Hay ciertas excepciones a la regla como Fluoruro de Aluminio, Carbonato de potasio y sulfito de sodio donde el Monel resulta mas adecuado. El tantalo tiene buena resistencia a la mayoría de los ácidos, soluciones químicas y compuestos orgánicos. Generalmente no es afectado por los metales líquidos. El Tantalo puede sufrir daños si se utiliza en aplicaciones de alta temperatura de oxígeno o nitrógeno: o con hidrógeno a cualquier temperatura. También se ve atacado por soluciones alcalinas fuertes y por fusiones alcalinicas como Hidróxido de Sodio. El Tantalo tiene un alto punto de fusión y buena resistencia a temperaturas elevadas, esto permite hacer los diafragmas delgados, ya que es demasiado caro.

## PFA (Recubierto de Teflón)

Existe una solución para las aplicaciones más corrosivas que consiste en un recubrimiento PFA (Teflón) para sellos remotos AISI 316 L. El recubrimiento PFA anticorrosivo es una cubierta sobresaliente de 0,2- 0,3 mm que puede resolver problemas severos de corrosión de manera efectiva, sin recurrir al uso de metales más caros. Su única limitación es su temperatura máxima de proceso de 250 °C (200 °C recomendado) además de que un mínimo incremento en la temperatura afecta la precisión.

## Hastelloy C, Monel o Acero Inoxidable Chapeado en Oro

El Hastelloy C, como el Monel y el acero inoxidable permiten la permeación del Hidrógeno por lo tanto no deben utilizarse para este servicio. Los átomos de Hidrógeno pueden difundirse a través del diafragma del transmisor, el cual es muy delgado y alcanzar el fluido de relleno, que puede combinarse con las moléculas de hidrógeno, ya que las moléculas de hidrógeno pueden atravesar el diafragma y quedar atrapadas en forma de burbujas en el fluido de relleno. Estas burbujas pueden afectar severamente el desempeño del transmisor.

Enchapando el material del diafragma con oro se provee protección contra la permeación del hidrógeno en todos los casos de procesos a alta temperatura y presión, que se sabe que incrementan la velocidad de permeación.

Otra forma de protección disponible es aplicando al diafragma del instrumento un gel resistente a la corrosión para reducir la permeación del Hidrógeno.

### **4.1.3. Otros criterios de selección de los elementos primarios**

Es importante saber como identificar el tipo de instrumento adecuado para cada aplicación. Las características que deben tomarse en cuenta son entre otras el requerimiento de sellos remotos, rango de medición, material de las partes que estarán en contacto con el proceso, fluidos de rellenos y límites de presión.

#### **4.1.3.1. Tipo de transmisor**

Lo primero que debe preguntarse es que tipo de medición se requiere, Nivel, Flujo o Presión (manométrica o absoluta), presión diferencial, nivel de interfase de un líquido, densidad, volumen. Otro aspecto importante son las condiciones del proceso, temperatura del proceso y del ambiente, presión (en particular condiciones de vacío), flujo y diámetro de la línea adecuado. Por ultimo debe conocerse el fluido y algunas de sus propiedades como su estado: liquido, gas, vapor condensable, si se solidifica o cuaja a la temperatura ambiente del proceso y su condición: si esta sucio, limpio o con sólidos en suspensión.

Presión: ¿diferencial, absoluta o manométrica?

Dado el rango de presión de operación del proceso es posible determinar si es necesario un instrumento manométrico, absoluto o de vacío. Los rangos de presión diferencial se especifican en Kilo Pascales (kPa), libras por pulgada cuadrada (psi) o pulgadas columna de agua (InWC) o milímetros columna de agua (mmWC). Los rangos de presión manométrica usualmente se expresan en libras por pulgada cuadrada manométricas (psig), o en bars manométricos (barsg), o rangos combinados ( 20 in Hg de vacío a 45 psig).

Los rangos de presión absoluta generalmente se expresan en pulgadas de mercurio absolutas (inHgA) o libras por pulgada cuadrada absolutas (psia).

Otra forma de determinar el tipo de instrumento es de acuerdo al numero de conexiones que requiere el proceso, por ejemplo si son dos, debe ir asociado a un instrumento de presión diferencial. Para el caso de una sola conexión y un rango muy cercano al cero absoluto, o que debe ser independiente de las variaciones de presión atmosférica, usualmente se especifica un tipo de instrumento de presión absoluta, para otras aplicaciones debe seleccionarse un instrumento de presión manométrica.

#### **4.1.3.2. Encapsulado**

En ambientes marinos existe riesgo de corrosión, gracias a la presencia de clorido, un ión que da lugar a la acelerada corrosión galvánica del encapsulado de aluminio a causa del contenido de cobre que el aluminio permite. Para este caso se debe especificar un bajo contenido de cobre en el aluminio, menos del 0,1 %.

#### **4.1.3.3. Empaques**

El material mas común de los empaques utilizados en transmisores de presión es el PTFE (teflón), por la resistencia a la corrosión que da a algunos materiales, se sabe que su limitación es en algunos procesos donde la temperatura tiene a variar algunos grados periódicamente, comprometiendo su firmeza por la limitada elasticidad del material. Por lo que estos casos se utilizan materiales especiales sugeridos por los fabricantes. Para las aplicaciones alimenticias se deben utilizar empaques aprobados por la Administración de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos (FDA).

#### **4.1.3.4. Límites de sobre presión**

Esta es la máxima presión que el transmisor puede soportar sin dañarse, y para el caso de los transmisores de presión diferencial es equivalente a la presión estática, la cual se aplica a ambos lados del transmisor.

El límite de presión depende de las características mecánicas del transmisor y en particular del tipo de sensor y el tipo de conexión al proceso. Los sensores para bajas presiones soportan bajas sobre presiones.

Los fabricantes normalmente diseñan sus transmisores para que puedan soportar presiones hasta de 14 MPa, pero puede variar de acuerdo a la selección del sensor.

En caso de requerir presiones mayores, algunos fabricantes ofrecen sensores especiales así como conexiones a proceso, estos se conocen como transmisores de alta estática.

Exponer el transmisor a presiones mayores a su límite máximo, puede provocar modificaciones mecánicas del diafragma, fugas, en algunos casos hasta ruptura del mismo (esto puede provocar la inserción de fragmentos del equipo al proceso). La capacidad de un transmisor de resistirse a la ruptura o fugas es certificada de acuerdo a la norma SAMA PMC 27.1 a una presión de 48 MPa (6960 psi), 77 MPa (11160 psi) para modelos de alta estática.

Para identificar el límite real de sobre presión, se deben revisar las condiciones extremas de la aplicación, por ejemplo:

Recipiente cerrado

- Presión máxima de la línea (rellena de algún fluido o gas inerte)
- Reflujo aguas abajo del equipo
- Presión máxima generada de la reacción química.

Tubería

- Rango de diseño de la línea
- Presión máxima de la bomba aguas arriba.

#### **4.1.3.5. Límites de temperatura**

La mayoría de los transmisores electrónicos están diseñados para operar a temperaturas ambiente de  $-20^{\circ}$  a  $-40^{\circ}$  °C bajo cero y de  $60^{\circ}$  a  $85^{\circ}$  °C, dependiendo del fluido de relleno usado en el transmisor.

Las variaciones en la temperatura ambiente deben ser cuidadosamente consideradas, por ejemplo si se instala un transmisor en un lazo de medición el cual se encuentra a la intemperie y recibe luz solar de 9:00 a 16:00 Hrs., entonces la salida del transmisor presentara corrimiento del cero durante las horas que reciba luz solar, cuando la temperatura del aire sea constante .Este corrimiento de cero es causa del incremento de la temperatura en el interior del transmisor por la radiación de la luz solar. Una pequeña lluvia o un fuerte viento frío puede tener efectos similares en el transmisor. Además los incrementos de temperatura aceleran la degradación de los componentes eléctricos del transmisor.

#### **4.1.3.6. Precisión**

Esta depende de la aplicación y del tipo de producto, ya que los fabricantes cuentan con diversas precisiones base; por ejemplo, se requiere una alta precisión cuando se mide flujo y debe totalizarse la transferencia física del fluido medido.

#### **4.1.3.7. Fuentes de alimentación**

Un corto circuito cercano puede inducir un alto voltaje (transiente) en las líneas de señal del transmisor. Si este voltaje alcanza la electrónica del transmisor puede ocasionarle daños serios, por esta razón la mayoría de los fabricantes ofrecen la opción de un supresor de transientes integrado dentro del transmisor. Este consiste en resistores, capacitores, diodos zener y un tubo de descarga de gas, cuando el transiente alcanza estos componentes, limitan la corriente y conducen este voltaje a tierra, por lo que se recomienda para lugares en lo que son frecuentes las tormentas eléctricas.

#### **4.1.3.8. Seguridad**

Una consideración muy importante para cualquier instrumento de control de proceso es la seguridad, que actualmente atiende diversas normas alrededor del mundo, la cuales establecen estándares de fabricación que certifican los equipos bajo estas normas.

Los equipos eléctricamente seguros se utilizan en procesos que involucran gases, vapores o fibras inflamables, polvos combustibles; esto para mantener las áreas seguras.

En Europa y la mayor parte del mundo, excepto en el continente americano la clasificación es de la siguiente manera:

ZONA 0: es un área donde un gas explosivo mezclado con aire se presenta continuamente por largos periodos.

ZONA 1: es un área donde un gas explosivo podría mezclarse con aire durante la operación normal del proceso.

ZONA 2: es un área donde un gas explosivo mezclado con aire no debe presentarse durante la operación del proceso y si se presenta será únicamente por un período corto.

En América esta clasificación tiene solo dos divisiones de acuerdo al NEC (*National Electrical Code*), artículo 500.

División 1: una circunstancia peligrosa puede presentarse en condiciones de operación normales.

División 2: una circunstancia peligrosa puede presentarse bajo condiciones anormales.

Actualmente, el NEC acepta también las normas IEC de acuerdo a su artículo número 505 de la edición del año 1996, ANSI/NFP70.

Los transmisores deben diseñarse con la capacidad de contener en su interior explosiones o incendios, para no permitir que se propaguen al resto de la planta, esto se logra gracias a que estos se mantienen correctamente sellados, estos equipos pueden clasificarse como a prueba de explosiones.

Limitar la energía eléctrica previene la ignición de mezclas peligrosas, de esta manera los arcos eléctricos que produzca el instrumento no tienen la suficiente energía para incendiar una atmósfera peligrosa. Este método se conoce como protección intrínseca y se clasifica en dos categorías de acuerdo a las normas IEC / CENELEC, que toman en cuenta el número de fallas:

Categoría “ia”: la protección se mantiene a pesar de la ocurrencia de dos fallas.

Categoría “ib”: la protección se mantiene a pesar de la ocurrencia de una falla.

Es evidente que “ia” es más segura que “ib”, por esta razón la primera se acepta para la ZONA 0 y la ZONA 1, y la segunda únicamente para la ZONA 2.

#### **4.1.4. Sellos remotos**

Los sellos remotos han sido diseñados de acuerdo a su amplia aplicabilidad en los transmisores de presión más allá de las limitaciones como temperatura máxima, procesos con fluidos sucios, etc.

Un sello remoto consiste en un elemento remoto hecho a partir de una conexión tipo *flange*, un vástago, y un diafragma de sello con una membrana conectada a través de un capilar hacia el cuerpo del transmisor(figura 65).

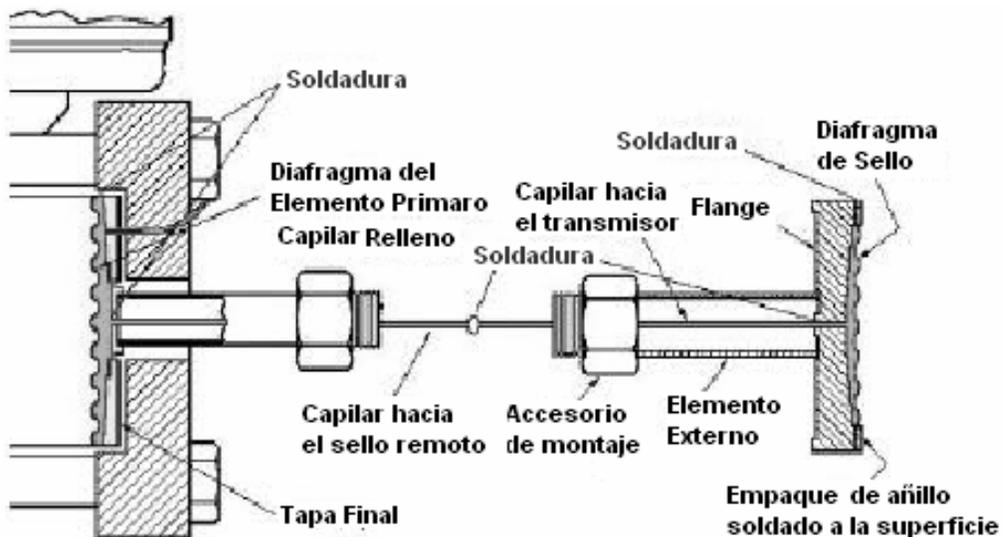
El sello remoto puede estar integrado al transmisor o separado de éste algunos metros por medio de un capilar, en este caso el capilar se protege con una armadura adecuada.

Una vez se conectan todos los componentes individuales, se evacua todo el aire del sistema y es relleno con un fluido incompresible.

De esta manera cuando se aplica la presión del proceso al diafragma de sello, este se deforma y transmite una fuerza al fluido de relleno, como éste líquido es incompresible, la fuerza es transmitida hidráulicamente hacia el diafragma del sensor en el cuerpo del transmisor, causándole una deflexión.

La deformación en el diafragma del sensor del transmisor es la base para la medición de presión.

Figura 65 **Detalle del diseño de los sellos remotos**



Recapitulando es importante comprender que con los equipos con sellos remotos se deben tomar en cuenta los efectos de la temperatura y los tiempos de respuesta.

## Tiempo de Respuesta

El tiempo de respuesta puede ser considerado como una constante de tiempo, y se puede definir como el tiempo requerido por la salida del instrumento para reflejar el 63% en respuesta del último cambio registrado por la entrada. Normalmente un instrumento alcanzara el 99.9 % de la respuesta total en un tiempo mayor o igual a cuatro veces la constante de tiempo.

El tiempo de respuesta de un transmisor puede incrementarse significativamente cuando este se conecta a un sello remoto. El tiempo de respuesta se ve afectado por:

- La longitud total del capilar que conecta al sello con el cuerpo del instrumento. El tiempo de respuesta es directamente proporcional a la longitud del capilar. Por lo tanto el capilar debe ser tan corto como la instalación lo permita.
- El diámetro interno del capilar. El tiempo de respuesta del instrumento es inversamente proporcional al diámetro del capilar elevado a la cuarta potencia. Un capilar de sección pequeña retrasa la respuesta.
- La viscosidad del fluido. Se intuye que a un fluido de alta viscosidad le tomará más tiempo transmitir la fuerza aplicada al sistema, a esto se suma que debe considerarse el efecto de la temperatura en la viscosidad (generalmente la viscosidad aumenta cuando la temperatura disminuye), por esta razón es importante tomar en cuenta la temperatura a lo largo del capilar. Una baja temperatura promedio, promete una respuesta lenta del sistema.

## **Efecto de la Temperatura**

Un cambio en la temperatura respecto a la temperatura a la cual el sistema fue llenado (podemos llamarla temperatura de referencia), causará que el fluido de relleno se dilate o contraiga. Los efectos de la temperatura dependen de las características físicas del fluido de relleno que se este utilizando. Los cambios en el volumen provocan cambios en la presión del sistema; esta puede causar deflexión del diafragma, lo cual puede cambiar la referencia de cero y por lo tanto introducir errores a la medición, por lo que después de la instalación debe ajustarse el cero. Para esto debe tomarse en cuenta que las variaciones de temperatura incluso las de temperatura ambiente introducirán errores en la medición.

Para el caso de medición de presión diferencial se puede aplicar una compensación por medio de dos sellos remotos con las mismas dimensiones y la misma longitud del capilar. Si la temperatura en ambas piernas del transmisor es la misma, el efecto se vera compensado minimizando el error.

Los diafragmas más rígidos también atenúan los efectos de la temperatura. Los transmisores con diafragmas más rígidos producirán incrementos más pequeños en la presión aplicada como efecto del incremento de la temperatura.

Incrementar el diámetro del diafragma decrementará su efecto elástico, se recomienda para la medición de rangos de presión muy pequeños. La longitud del capilar esta definida por la instalación, pero el tiempo de respuesta puede mejorarse con diámetros internos más grandes, pero esto implica mayor volumen del fluido de relleno con temperatura negativa. Por lo tanto, debe hacerse una compensación entre temperatura y tiempo de respuesta.

## **Tecnología de construcción soldada**

Otra fuente crítica de error en los sellos remotos es la posibilidad de que algún gas ingrese al sistema capilar durante su fabricación. El problema radica en que los gases son compresibles, por lo que se debe tener un especial cuidado cuando se rellena el capilar, por esta razón los capilares son llevados al vacío absoluto y luego son rellenos. Después de esto se sellan y se les practica una rigurosa prueba de fugas.

Esta tecnología asegura que no existirán entradas de aire en varios años de servicio.

Estas características son obligatorias para aplicaciones de alto vacío, en la cual una partícula microscópica de gas tiende a expandir tremendamente su volumen cuando se le aplica una presión cercana al cero absoluto.

## **Aplicaciones**

En los transmisores de presión conectados directamente a la tubería del proceso por medio de líneas de impulso, el fluido del proceso debe dejar la tubería, llenar las líneas de impulso e ingresar al transmisor. Se recomienda utilizar sellos remotos para prevenir que el fluido salga de la tubería, o entre al transmisor en casos en que el fluido de proceso sea:

- Altamente corrosivo.
- El fluido es sucio, cargado de sólidos o viscoso y puede ensuciar la línea de impulso.

- El fluido puede solidificarse en la línea de impulso o en el cuerpo del transmisor, a causa de un decremento en la temperatura.
- El fluido es muy peligroso para ingresar al área donde se encuentra instalado el transmisor.
- El cuerpo del transmisor debe instalarse lejos del proceso para su fácil mantenimiento.
- El límite de temperatura excede el límite máximo recomendado para el transmisor
- También puede complicarse el uso de líneas de impulso demasiado largas, por lo que se hace más práctico aplicar los sellos remotos.

#### **4.1.5. Elementos primarios con diafragmas especiales**

Los elementos primarios con diafragmas especiales, son llamados así ya que pueden ser confeccionados de acuerdo a la aplicación, por que las fábricas con la colaboración del cliente pueden construir el sello mas adecuado de acuerdo al proceso.

Existen diversos tipos de conexión a proceso de los transmisores de presión, a continuación mencionamos las más convencionales, ya que como se ha dicho los fabricantes pueden llegar a acuerdos con los clientes y realizar diseños a criterio del cliente según la aplicación.

Montaje en tubería o transmisores de conexión directa:

Se utilizan generalmente cuando se va a medir un fluido (gas o líquido), el cual estará en contacto directo con el transmisor (figura 66), y tiene las siguientes características:

- Fluido homogéneo
- No ataca los materiales de la construcción del transmisor con corrosión
- Limpio y libre de sólidos que puedan taponar la línea de presión
- No se solidificará o cuajará a temperatura ambiente ya que esto también podría taponar la línea de presión
- Fluido con baja viscosidad
- La temperatura de este fluido no es mayor de  $107^{\circ}\text{C}$  , a menos que sea posible que la tubería de conexión al proceso sea capaz de disipar la temperatura del fluido hasta este límite.

Figura 66 **Transmisor de conexión directa o con tubería**



Trasmisor de un solo puerto

Transmisores con diafragma de montaje directo

Se entiende por montaje directo todos los casos en que el transmisor puede conectarse directamente al proceso, sin necesidad de bridas para el transmisor o para la tubería de impulso o presión.

Cuando el fluido es viscoso o sucio, contiene sólidos que puedan taponar la tubería de presión, pueda solidificarse o cuajarse a temperatura ambiente, se recomienda utilizar una conexión extendida con diafragma al ras (figura 67).

Figura 67 **Transmisores con diafragma de montaje directo**



Montaje directo de doble puerto con sello al ras



Montaje directo simple con sello al ras



Montaje directo de doble puerto con sello extendido

Los transmisores de montaje por medio de *flange* se pueden utilizar cuando el fluido del proceso es corrosivo y puede atacar las partes internas del transmisor, siempre y cuando el material del sello o diafragma pueda resistir el ataque de este fluido.

Un diafragma de montaje directo requerido para el caso de una aplicación alimenticia o farmacéutica, requiere un sello especial para asegurar la máxima limpieza en el proceso de conexión. Además en este caso también el fluido de relleno debe ser no tóxico, como Glicerina y Agua.

#### Transmisores con sellos remotos

Los transmisores con sellos remotos (figura 68) se utilizan generalmente para las mismas aplicaciones que los de montaje directo (cuando los fluidos son no homogéneos, pueden corroer el material del transmisor, son sucios o contienen sólidos).

También se requieren cuando la temperatura del fluido es mayor de 210 °C en transmisores de montaje por *flange* (y un sistema de enfriamiento no es práctico), o para el caso en que las distancias entre las tomas de presión para un transmisor de presión diferencial sean grandes (arriba de 10 metros y en algunos casos un poco más), para eliminar la necesidad de recipientes de sello, su instalación y mantenimiento.

En el caso de que el fluido pueda solidificarse o cuajarse a la temperatura del ambiente de trabajo, se recomienda un diafragma extendido con sello al ras, ya que reduce la acumulación del fluido en la boquilla o toma de presión.

Figura 68 **Transmisores con sellos remotos**



Transmisor de simple puerto con sello roscado



Transmisor de doble puerto con sello remoto de diafragma al ras



Transmisión de doble puerto con un sello remoto y recubrimiento de teflón

Transmisores con sellos remotos para vacío:

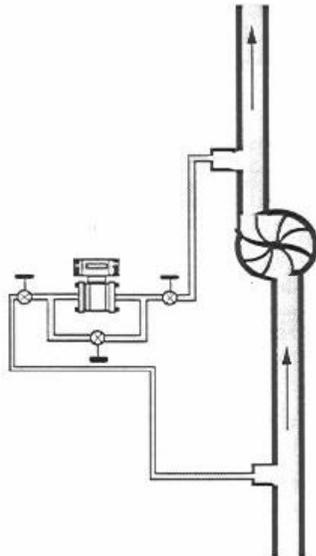
Debe tomarse en consideración la posición del transmisor respecto al punto de medición. Se recomienda instalar el transmisor por debajo, o al nivel de la toma de alta presión del sistema como se muestra en la figura 69.

Figura 69 **Modo de instalación correcto**



Para la aplicación de un transmisor de presión diferencial a través de un ventilador (figura 70), no permiten el uso de un transmisor de sello remoto, por que los rangos son muy pequeños y usualmente no hay suciedad ni sólidos en suspensión presentes.

Figura 70 **Medición de flujo a través de un ventilador**



#### **4.1.6. Aplicaciones para transmisores de presión multivariable**

Tradicionalmente los transmisores de presión multivariable encuentran su mejor aplicación en la medición de flujo a partir de una señal de presión diferencial utilizando una ecuación simplificada para flujo másico compensando la medición por temperatura y presión estática (presión de la línea).

Estos transmisores miden la presión diferencial y absoluta con el mismo sensor, y la temperatura del proceso con un simple detector de resistencia/temperatura RTD (por sus siglas en inglés). Gracias a su mejorada capacidad de cálculo es posible obtener los resultados dinámicos del flujo másico o volumétrico compensado para gases, vapor o líquidos.

#### **4.2. Elementos primarios para la medición de flujo por presión diferencial**

Como se mencionó anteriormente un flujo puede medirse por medio de un transmisor de presión, que debe seleccionarse de acuerdo al elemento que cause la restricción (elemento primario), como una placa de orificio, o un medidor tipo venturi o pitot.

La selección de los elementos primarios para la medición de flujo que se encuentran comúnmente en la industria puede referirse a la siguiente tabla, tomando en cuenta que tanto la aplicación, como los criterios del fabricante y del ingeniero instrumentista, son el mejor fundamento para la buena especificación y selección del equipo a utilizar.

Tabla XIX **Comparativa de elementos para medición de flujo**

Elemento primario	Fluidos recomendados	Pérdida de presión	Exactitud típica en %	Medidas y diámetros (pulgadas)	Diámetros de tubería libres	Coste Relativo
Placa de Orificio	Líquidos limpios; algunos líquidos viscosos, vapor y gas	Alta	$\pm 1$ a $\pm 2$ de escala completa	10 a 30	30	Bajo
Tubo Venturi	Líquidos no viscosos	Baja	$\pm 1$	5 a 20	10	Alto
Tubo Pitot	Líquidos limpios	Muy baja	$\pm 1.5$ a $\pm 4$	20 a 30	30	Bajo
Medidor tipo Cuña	Líquidos limpios, sucios y viscosos, gases y vapor	Media	$\pm 5$	5 a 10	10	Medio
Medidor tipo Cono	Líquidos limpios y gases	Media	$\pm 5$	1 a 10	10	Medio
Medidor Annubar	Líquidos limpios y gases	Baja	$\pm 1$	1 a 10	10	Alto
Toberas	Líquidos limpios y con sólidos en baja cantidad	Media	$\pm 1.5$	10 a 30	30	Alto

#### 4.2.1. Elementos primarios para la medición de flujo de gases

Realmente no existe una clasificación exacta que delimite el uso de los elementos y permita diferenciar su aplicación, tanto para gases como para vapores, ya que esto depende de las condiciones de los mismos y en algunos casos pueden llegar a ser muy similares y coincidir con los rangos especificados por los fabricantes, a continuación se describen de acuerdo a su uso común en la industria.

#### **4.2.1.1. Aplicaciones para la medición de flujo de vapor de agua**

La medición de vapor de agua por medio de elementos de presión diferencial es bastante crítica y debe tenerse un especial cuidado en la selección del mismo, ya que un elemento que ocasione caídas de presión demasiado altas, puede provocar la condensación del mismo.

#### **4.2.1.2. Aplicaciones para la medición de flujo de gases ideales**

Los elementos primarios, que trabajan por presión diferencial que se pueden utilizar son los siguientes:

##### **EI TUBO DE PITOT**

Para determinar el lugar de inserción de los tubos de pitot, es necesario localizar el punto de máxima velocidad, desplazando el orificio de los mismos a lo largo del diámetro de la tubería. A pesar de que un tubo de Pitot puede calibrarse para medir caudal en  $\pm 0,5\%$ , la distribución inestable de velocidades puede desencadenar errores importantes. Esto constituye uno de los motivos por lo que estos elementos se utilizan sobre todo para la medida de caudal de gases, ya que la variación de velocidad de la mediana con respecto al centro no constituye un inconveniente grave. Las aplicaciones de los tubos de Pitot están muy limitadas en la industria, dada la facilidad con que se obstruyen por la presencia de cuerpos extraños en el fluido a medir. En general, se utilizan en tuberías de gran diámetro, con fluidos limpios, principalmente gases y vapores. Su precisión depende de la distribución de las velocidades y generan presiones diferenciales muy bajas, que resultan difíciles de medir.

## PLACA DE ORIFICIO

En general, las placas de orificio se colocan de forma concéntrica dentro del tubo, no obstante, para medición de gases, se suelen utilizar orificios seccionales u orificios excéntricos. Es decir, que los orificios no siempre se deben colocar al centro de la tubería. En general estas disposiciones se utilizan si el fluido está sucio y puede dar lugar a sedimentación, entonces se realiza el orificio en la parte inferior para evitar la acumulación de sólidos que se puedan encontrar en suspensión.

### **4.2.2. Elementos primarios para la medición de flujo de líquidos**

A continuación se resumen distintos elementos para la medición de flujo de líquidos y se destacan sus características operativas.

## PLACA DE ORIFICIO

El uso de la placa de orificio aunque es el mas común en la industria es inadecuado en la medición de fluidos con sólidos en suspensión pues estas partículas se pueden acumular en la entrada de la placa., el comportamiento en su uso con fluidos viscosos es errático pues la placa se calcula para una temperatura y una viscosidad dada y produce las mayores pérdidas de presión en comparación con los otros elementos primarios.

Las mayores desventajas de este medidor son su capacidad limitada y la perdida de carga ocasionada tanto por los residuos del fluido como por las perdidas de energía que se producen cuando se forman vórtices a la salida del orificio.

## TOBERA

La tobera de flujo, es un instrumento de medición que permite medir diferencial de presiones altos, esto es, cuando la velocidad del flujo es mucho mayor.

Al instalar un medidor de este tipo se logran mediciones mucho más exactas. Además este tipo de medidor es útil para fluidos con muchas partículas en suspensión o sedimentos, su forma hidrodinámica evita que sedimentos transportados por el fluido queden adheridos a la tobera.

## TUBO VENTURI

El tamaño del tubo de Venturi se especifica mediante el diámetro de la tubería en la cual se va a utilizar y el diámetro de la garganta; por ejemplo, un tubo de Venturi de 6" x 4" se ajusta a una tubería de 6" y tiene una garganta de 4" de diámetro.

El tubo Venturi entre otras características, se utiliza cuando es importante limitar la caída de presión, consiste en un estrechamiento gradual cónico y una descarga con salida también suave y se suele usar para fluidos sucios y ligeramente contaminados.

### **4.2.3. Aplicaciones especiales para compensación por presión y temperatura**

Cuando se habla de compensación es normal pensar en transmisores de presión multivariable, que hacen corrección dinámica de flujo junto con cálculo continuo del número de Reynolds, y del coeficiente de flujo mejorado la precisión en la medición de flujo ya sea másico o volumétrico, en casi cualquier elemento primario.

Algunas aplicaciones típicas de para esta compensación se pueden hacer en:

- Flujo de vapor: por lo regular es de tipo másico (LB/hora), donde se requiere una compensación de la densidad.
- Flujo de aire: Cuando se tiene una aplicación de compensación de flujo de aire y la temperatura de este varía 50° F o más, el flujo de aire debe compensarse por la densidad del flujo másico del aire, para determinar el flujo real.
- Flujo de gases combustibles: la compensación permite una mayor precisión en la medición, ya que el transmisor multivariable hace la compensación por variaciones de densidad.
- Flujo de líquidos calientes: al igual que para los gases estos también requieren una compensación por variaciones de densidad, la cual dependen de la temperatura.

La compensación presenta ventajas como que el costo del elemento primario se mantiene, y en este caso los elementos deprimógenos son los mas baratos, se hace compensación de acuerdo a la presión estática de la línea, lo que ayuda a mejorar la precisión llevándola a una base de 1% para casi todos los elementos primarios. Solo debe instalarse un accesorio, que es el del sensor de temperatura.

#### **4.2.4. Elementos primarios para la medición de flujo en aplicaciones sanitarias**

Los elementos primarios para las aplicaciones sanitarias en su mayoría son del mismo tipo de construcción y principios de funcionamiento que todos los elementos de presión diferencial en la medición de flujo, básicamente los tubos de *venturi*, *pitot* y *annubar*, con ciertas características entre las que destacan los materiales de construcción, que no deben contaminar los fluidos de proceso, por lo que el material preferido es el acero inoxidable AISI 316. Otra característica importante son los tipos de conexión sanitarias, básicamente la conexión *tri-clamp*, y la conexión *wafer*, aunque también se utilizan las conexiones convencionales roscadas y tipo *flange* con la característica que ambos tipos deben ser de acero inoxidable, al igual que todo el cuerpo del instrumento.

En la sección siguiente se desarrolla un apartado en el que se encuentran las conexiones sanitarias tipo *Tri-clamp* convencionales para todas las aplicaciones, estas conexiones a proceso se utilizan en este tipo de medidores de acuerdo a su aplicación.

#### **4.3. Elementos primarios para la medición de nivel por presión**

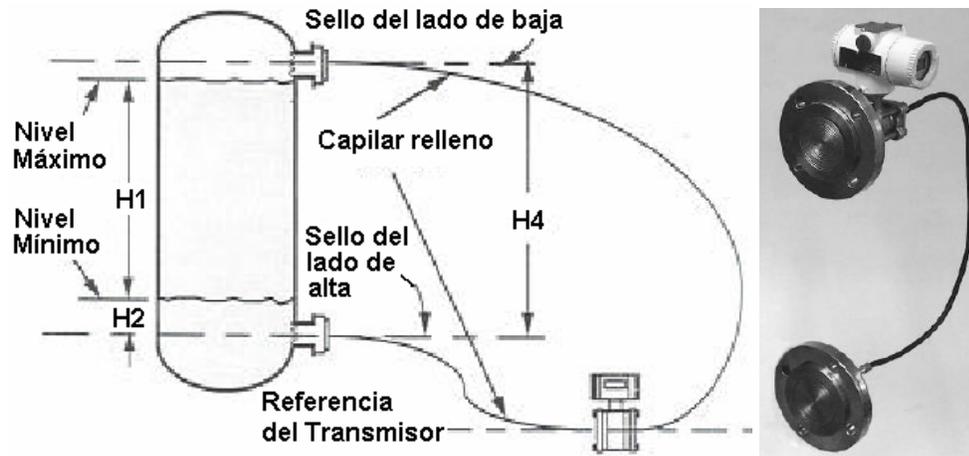
Los criterios necesarios para la selección correcta de la instrumentación para la medición de presión pueden variar de acuerdo a la aplicación, siendo la experiencia del instrumentista la mejor referencia para la toma de la decisión mas adecuada, por lo que a continuación se muestran ejemplos básicos para formar un criterio que debe ampliarse de acuerdo a la experiencia en este campo.

#### 4.3.1. Aplicaciones de los elementos primarios con sellos remotos y extendidos

En la medición de nivel por medio de presión se aplican diversos tipos de conexión, uno de ellos son los sellos remotos ya sean tipo *flange*, *waffer*, etc., que comúnmente se utilizan para las situaciones siguientes:

- Cuando la temperatura del fluido contenido en el tanque es mayor de 210 °C se utilizan conexiones de sello remoto tipo *flange* para procesos industriales comunes o tipo *waffer* cuando se trata de aplicaciones sanitarias (en caso de que no sea práctico enfriar el fluido del proceso)
- Cuando las tomas de presión en un tanque cerrado al medir nivel por presión diferencial se encuentra demasiado lejos una de la otra (arriba de los 10 metros y en algunos casos un poco mas).
- Para eliminar la necesidad de un recipiente de sello, su instalación y mantenimiento, en particular para fluido en la industria farmacéutica o alimenticia, donde éstos no deben utilizarse.
- Los diafragmas con sellos extendidos se utilizan en casi todos los casos, pero primordialmente cuando los fluidos pueden solidificarse o cuajarse a la temperatura del ambiente en que se encuentren.
- Otra aplicación común para los sellos remotos extendidos es cuando los fluidos son pastosos como el bunker, la pulpa, las mieles, y otros fluidos muy viscosos, ya que el sello extendido se instala al ras de la pared interior del tanque que lo contenga para que este resbale por toda la superficie sin acumularse en el diafragma del sello del transmisor de presión.

Figura 71 **Instalación de transmisor con sellos remotos**



Para el caso de los transmisores con sellos remotos el cálculo del rango se efectúa de acuerdo a la siguiente fórmula, referida a la figura 71:

$$\text{Valor del rango bajo} = [H2 \cdot GS] - H4 \cdot Gc,$$

$$\text{Valor del rango alto} = \text{Valor del rango bajo} + H1 \cdot GS$$

Donde:

GS = gravedad específica del fluido de proceso

Gc = gravedad específica del fluido en el capilar

Es importante tener la precaución para cuando se va a medir vacío, de instalar el transmisor por debajo o al nivel de la toma de alta presión.

#### **4.3.2. Elementos primarios para aplicaciones sanitarias**

Existen aplicaciones muy especiales en la industria farmacéutica como alimenticia, donde se requieren conexiones de tipo *Tri-Clamp* o DIN 11851, de acero inoxidable AISI 316 para evitar contaminar los productos, y donde incluso el cuerpo del transmisor debe ser de este material.

El fluido de relleno seleccionado debe ser Reconocido Totalmente como Seguro (*GRAS – Generally Recognized As Safe*) por la Administración de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos (*FDA – Food and Drug Administration of the US*).

Las conexiones sanitarias más comunes en el mercado vienen normalizadas a diferentes tamaños (diámetros) y clasificadas por tipos que se identifican por medio de una letra (I, Q, por ejemplo), por lo regular se les conoce como *tri-clamp* y las medidas se especifican en pulgadas (3/4", 1", 1-1/2", 2", 2-1/2", 3", 3-1/2" & 4"). Entre las conexiones mas comunes podemos mencionar:

Figura 72 **Conexión H, *Tri-clamp* G&H macho o *H line***

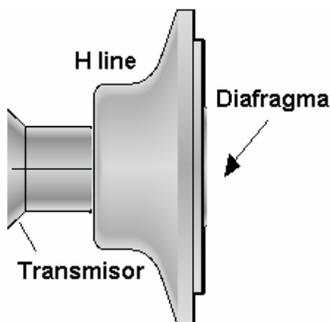


Figura 73 **Conexión I, *Cherry-Burrell* macho o *I line***

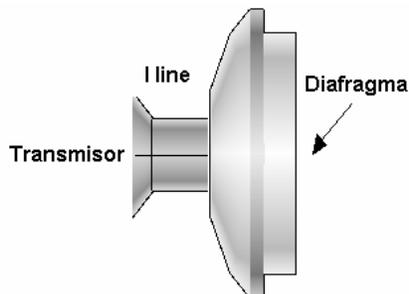


Figura 74 **Conexión Q, *Cherry-Burrell* o *Q line***

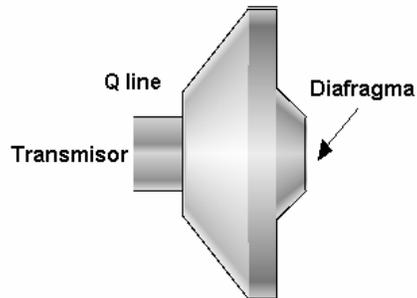


Figura 75 **Conexión T, *Sello-Bevel* o # 14**

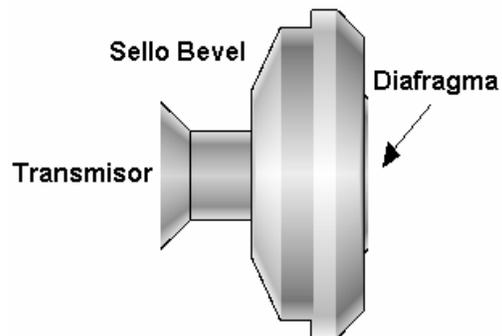


Figura 76 **Conexión U, *Tri-Clamp***



### 4.3.3. Escogencia de elemento primarios para tanques abiertos y cerrados

Cando se va a medir nivel en un tanque abierto, usualmente se indica un transmisor de presión manométrica. Pero también puede ser de simple o doble puerto (figura 77) para un transmisor diferencial, claro que el puerto simple es mas barato, pero el de doble puerto puede necesitarse si se requiere un bajo rango de presión manométrica.

Figura 77 Transmisor de doble puerto



Los rangos de presión diferencial se calculan como sigue:

Valor del rango bajo =  $(H_2 * GS)$

Valor del rango alto = valor del rango bajo +  $(H_1 * GS)$

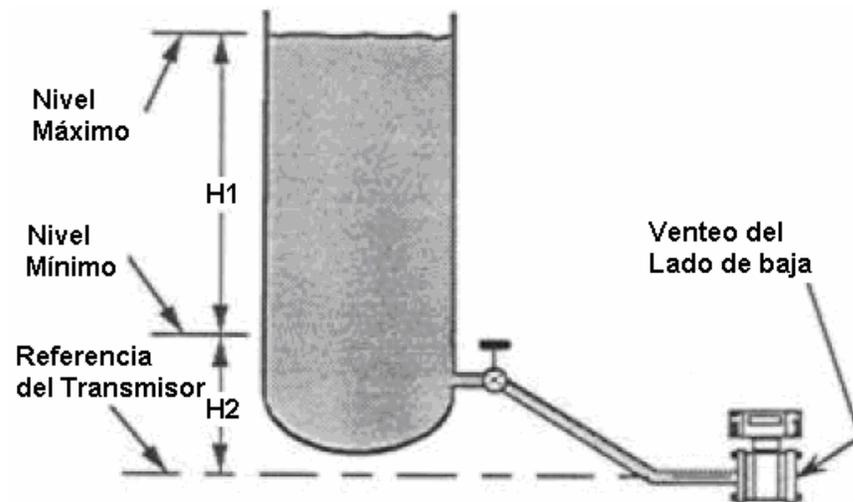
Donde GS = gravedad especifica

Una vez seleccionado el rango de presión diferencial, deben seleccionarse otras características del transmisor como la conexión tipo *flange* o sello remoto. Estas deben seleccionarse de acuerdo a las características del fluido en el tanque y los criterios que se resumen a continuación:

- Se recomienda una conexión tipo *flange* para el lado de alta presión, para el caso de fluidos sucios y temperaturas mayores de 107 °C. También se debe tomar en cuenta que puede que se necesite un transmisor de doble puerto si se necesita mayor precisión.

- Un diafragma a ras en un sello extendido cuando el fluido contenido en el tanque puede congelarse o cuajarse a temperatura ambiente resulta ser el mas adecuado.
- Una solución alternativa disponible para fluidos sucios o corrosivos o para fluidos a alta temperatura es el tubo de burbujeo.

Figura 78 **Definición de rangos para medición nivel tanque abierto**



Cuando se va a medir nivel en un tanque cerrado (figura 79) se utiliza un transmisor de presión diferencial.

Los rangos de presión diferencial se calculan como sigue:

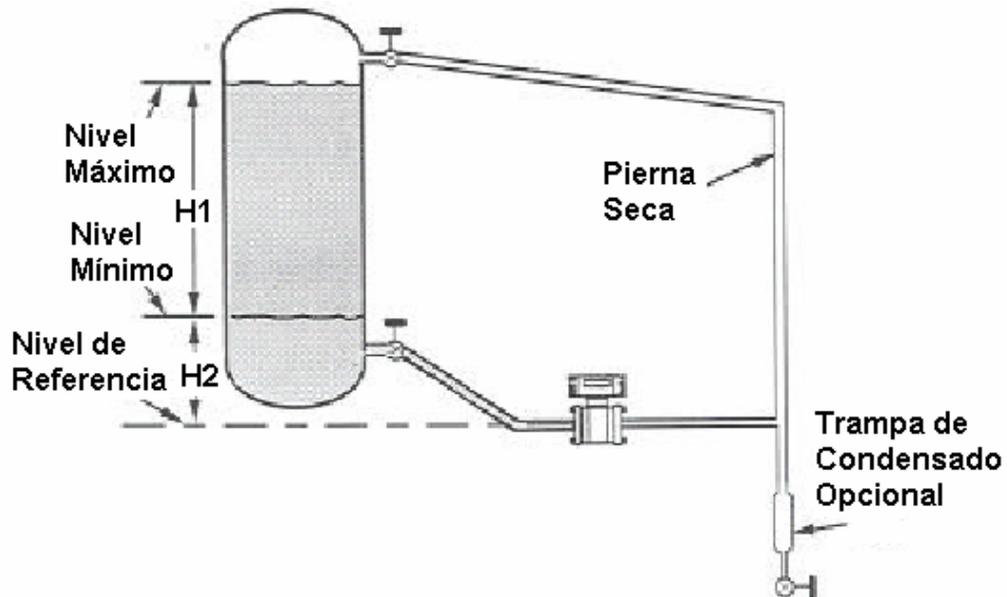
$$\text{Valor del rango bajo} = (H2 \cdot GS)$$

$$\text{Valor del rango alto} = \text{valor del rango bajo} + (H1 \cdot GS)$$

Donde GS = gravedad específica

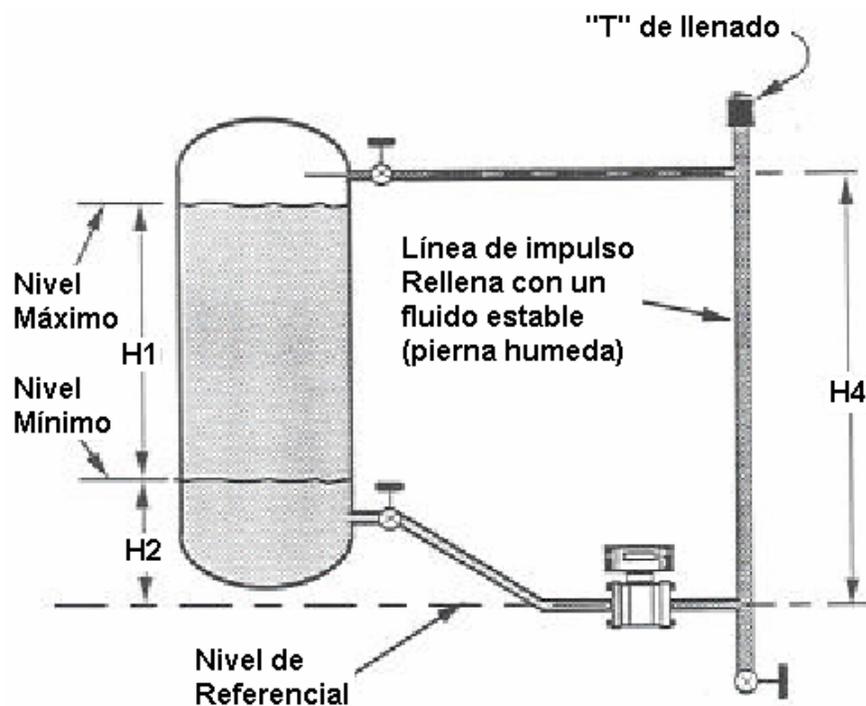
Puede utilizarse una conexión directa en el lado de alta presión cuando el fluido contenido en el tanque esta limpio y libre de vapor condensado.

Figura 79 Definición de rangos para medición nivel tanque cerrado



Si existen condensados de vapor puede utilizarse el siguiente tipo de instalación y los siguientes cálculos:

Figura 80 Medición nivel por método de pierna húmeda



Valor del rango bajo =  $[H_2 \cdot GS] - H_4 \cdot GI$ ,

Valor del rango alto = Valor del Rango bajo +  $H_1 \cdot GS$

Donde:

GS = gravedad específica del líquido del proceso

GI = gravedad específica del fluido de la pierna húmeda

Las otras características del transmisor como la conexión tipo *flange* o sello remoto deben seleccionarse de acuerdo a las características del fluido en el tanque y los criterios que se resumen a continuación:

- Un transmisor de doble puerto montado directamente en el lado de alta presión del tanque es la solución más económica para el caso de flujos que no están calientes, sucios o son corrosivos.
- Un sello tipo *flange* en el lado de alta presión se recomienda para el caso de fluidos sucios, o a una temperatura mayor de 107 °C.
- Si el transmisor o elemento primario está en contacto con fluidos farmacéuticos o alimenticios se necesita utilizar sellos especiales, para asegurar al máximo posible la limpieza de la conexión. Para estos casos el fluido de relleno debe ser no tóxico, como la glicerina y el agua, o el aceite vegetal.
- De acuerdo con lo mencionado en secciones anteriores también pueden utilizarse sellos remotos y/o extendidos.

#### **4.3.4. Importancia de la medición compensada**

Cuando se diseña un sistema para determinar en forma muy exacta la altura de un líquido, debe recordarse que la presión medida por el transmisor es la presión total hidrostática ejercida por la columna del líquido mas la presión atmosférica local ejercida sobre la superficie del líquido.

En sistemas que utilizan transmisores de tipo absolutos o sellados, la variación de la presión atmosférica puede producir errores aleatorios del orden de +/- 15 cm de columna de agua. Por ejemplo, si la columna a medir tuviera 100 cm, se podría llegar a un error de +/- 15%

Se hace entonces necesario compensar la incidencia de la presión atmosférica en la medición. Esto se realiza fácilmente utilizando transmisores de presión diferencial o de doble puerto en donde el lado de baja presión vincula el interior de la cápsula con la presión atmosférica.

De esta forma el transductor solo mide la columna de líquido teniendo presente del otro lado, en el otro diafragma la presión atmosférica que se resta a la que se esta ejerciendo sobre el líquido.

## 5. CALIBRACIÓN Y AJUSTE DE LOS TRANSMISORES DE PRESIÓN

Cuando hablamos de calibración debe notarse que ésta **no** incluye operaciones de ajuste, y tampoco implica la comparación con requisito alguno, por lo que debe entenderse que la verificación es una actividad no incluida en la calibración, aunque sean necesarios los resultados de una calibración para soportarla.

Los procedimientos de calibración del laboratorio deben considerar el mantenimiento de la trazabilidad asociado al cumplimiento de empleo del patrón entre el 10 % y el 100 % de su alcance, en consecuencia de su calibración. El uso del patrón abajo del 10 % de su alcance debe ser ponderado, justificado, comprobado y documentado como una desviación.

La calibración de transductores y transmisores de presión debe observar igual cantidad de puntos de calibración que los establecidos para los manómetros.

La calibración de transductores y transmisores de presión debe realizarse mediante la aplicación de presión y no mediante simulación eléctrica de una señal de presión. La trazabilidad de las calibraciones en presión se obtiene aplicando una presión con una incertidumbre determinada, aún cuando la indicación del medidor sea una magnitud eléctrica.

Para el mantenimiento de la trazabilidad en la calibración de los transmisores de presión cuya indicación es una magnitud eléctrica, los resultados deben expresarse tanto en la unidad eléctrica, como su equivalencia en unidades de presión.

## **5.1 Utilidad de la trazabilidad**

La trazabilidad es la propiedad de las mediciones que permite hacer comparaciones entre ellas, por lo que es indispensable para construir la confianza en las mismas, sólo tienen sentido las comparaciones entre medidas asociadas a una misma magnitud.

Un patrón nacional de medida se establece mediante la realización física de una unidad de medición, con la característica de que mantiene, tanto la menor incertidumbre de medición en una nación, cuanto la equivalencia con patrones nacionales de otros países. El patrón nacional constituye el primer eslabón de la cadena de trazabilidad en una nación. Las calibraciones de instrumentos o patrones de medición constituyen los eslabones de la cadena de trazabilidad.

## **5.2 Método de calibración por comparación directa**

### **5.2.1 Definiciones**

*Trazabilidad:* Propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón, tal que éstos puedan ser relacionados con referencias determinadas, generalmente patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todas incertidumbres determinadas.

*Patrón:* Medida materializada, aparato de medición o sistema de medición destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad, o uno o varios valores conocidos de una magnitud, para servir de referencia.

*Calibración:* Conjunto de operaciones que establecen bajo condiciones especificadas, la relación entre los valores indicados por un aparato o sistema de medición o los valores representados por una medida materializada y los valores correspondientes de la magnitud realizada por los patrones.

*Mensurando:* Presión obtenida directamente o en su caso, mediante tablas o ecuaciones que relacionen una señal de salida con la presión.

*Intervalo típico de medición:* El límite superior de medición quedará acotado por capacidad de los equipos, sin embargo el límite inferior típicamente se establece al 10 % del alcance de medición. Pudiendo reducirse realizando una degradación de la exactitud del equipo patrón.

*Incertidumbre de medición esperada:* La incertidumbre resultante no podrá ser menor que la incertidumbre de los patrones de referencia utilizados en la calibración. Para realizar el servicio de calibración se debe mantener una relación mínima de incertidumbre entre el patrón y el equipo calibrado de 4:1, para que el impacto del patrón utilizado en la incertidumbre para la calibración del instrumento no sea mayor al 5 % de acuerdo a la ley de propagación de distribuciones.

### **5.2.2 Método y Sistema de Medición**

Se debe considerar para realizar una calibración por el método de comparación directa:

### **5.2.2.1 Método de Medición**

*Comparación directa:* Comparación de las lecturas del instrumento bajo calibración contra las lecturas del patrón utilizado conectados a la misma fuente de generación de presión, garantizando la hermeticidad del sistema (ANSI B540-1).

### **5.2.2.2 Procedimiento de Medición**

1. Verificar si el transductor o transmisor está dentro del alcance de acreditación.
2. Revisión de condiciones físicas del transductor o transmisor a calibrar (impurezas, hermeticidad, integridad física, etc.).
3. Conecte eléctricamente el transductor o transmisor de acuerdo a las especificaciones del fabricante, permitiendo el calentamiento del transductor o transmisor ocasionado por el funcionamiento de la electrónica del mismo.
4. La calibración se desarrollará después de establecido el equilibrio térmico entre el transductor o transmisor a calibrar, sistema de calibración y el medio ambiente.
5. Conectar el transductor o transmisor en su posición de trabajo en el sistema de calibración.
6. Verificar la hermeticidad del sistema de calibración incluyendo el transductor o transmisor a calibrar al 100 % del alcance de calibración.
7. Determinar los niveles de referencia para los equipos.
8. Seleccionar los puntos mínimos de medición de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla X **Selección del número de puntos de calibración**

<i>Clase de exactitud</i>	<i>No. de puntos mínimos a calibrar</i>
CE ≤ 0,5 %	8
0,5 % < CE ≤ 2 %	5
CE > 2 %	3

Los puntos deberán incluir un punto al 10 %, otro al 50 % y otro al 100 % del alcance de medición del manómetro. Los puntos restantes deberán ser distribuidos uniformemente a lo largo del alcance de medición.

El cero no se considera un punto de calibración.

9. Aplique presión hasta el 100 % del alcance de medición del transductor o transmisor bajo calibración por lo menos 2 veces, manteniéndola 1 minuto cuando menos en cada aplicación.
10. Antes de iniciar cada ciclo de calibración se deberá de establecer el cero del transductor o transmisor bajo calibración.
11. Asegurar que el cero del indicador utilizado para medir la señal de salida se corrige (p. e. si se tiene un corrimiento de 3 mA deberá ser corregido para todas las lecturas).
12. Tomar como mínimo 3 repeticiones en cada punto de medición, realizadas en 2 ascensos y 1 descenso.
13. Las lecturas deberán estar de acuerdo a la exactitud del transductor o transmisor.
14. Se deberán realizar las correcciones necesarias para las magnitudes de influencia del sistema de calibración y transductor y/o transmisor bajo calibración en cada punto de medición.
15. Determine la curva de ajuste del transductor o transmisor. La curva puede ser de la siguiente forma:

$$y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D$$

Donde:

$y$  es el valor correspondiente en unidades de presión a la lectura del transductor o transmisor.  $x$  es la lectura del transductor o transmisor en unidades de la señal de salida (mA, mV, V, Hz, etc.)  $A, B, C, D$  son los coeficientes de la curva de ajuste de transductor o transmisor generados por el método numérico utilizado para el ajuste.

16. Determine el error residual del transductor o transmisor utilizando la curva de ajuste del transductor o transmisor.

$$E_{ires} = y_i - L_{Pi}$$

Donde:

$E_{ires}$  es el error residual promedio del transductor o transmisor en el  $i$ -ésimo punto de medición.

$y_i$  es valor promedio correspondiente en unidades de presión en el  $i$ -ésimo punto de medición.

$L_{Pi}$  es la lectura promedio corregida del patrón en el  $i$ -ésimo punto de medición.

17. Los resultados deberán ser expresados en una tabla que contenga como mínimo, los valores del patrón, transductor o transmisor en las unidades eléctricas y los valores en presión calculados con la curva de ajuste, error residual e incertidumbre de medición.
18. Al menos los resultados del patrón deberán ser expresados en múltiplos o submúltiplos de Pa y en la unidad del instrumento bajo calibración, expresando el factor de equivalencia.

### 5.2.2.3 Equipos e Instrumentos para la calibración

El laboratorio debe contar con un sistema para controlar la temperatura ambiente con una estabilidad de  $\pm 1$  °C. La temperatura puede estar entre 18 °C y 28 °C.

En el caso de utilizar balanzas de presión como patrón, el laboratorio debe monitorear y controlar la humedad relativa. La humedad relativa puede estar entre el 20% y el 80%.

Los siguientes instrumentos son los necesarios para poder llevar a cabo la calibración:

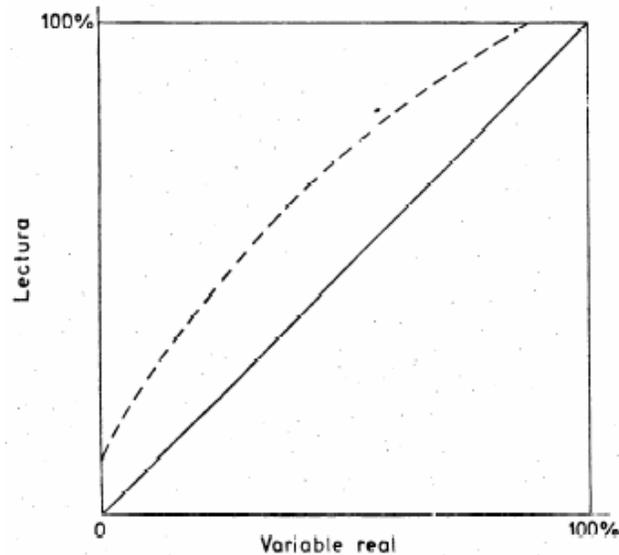
- Instrumento patrón (columna de líquido, balanza de presión o manómetro de alta exactitud)
- Fuente de generación de presión (bomba de aceite o de fluido hidráulico con dos conexiones de salida)
- Dispositivo para medir diferencias de alturas
- Nivel
- Barómetro
- Termómetro
- Higrómetro
- Gas seco o inerte
- Base rígida y adecuada para los instrumentos
- Todos los instrumentos necesarios para incluir las correcciones en el patrón utilizado

### **5.3 Errores detectados en los instrumentos durante la calibración**

Un instrumento representativo, se considera que está bien calibrado cuando en todos los puntos de su campo de medida, la diferencia entre el valor real de la variable y el valor indicado, registrado o transmitido, esta comprendido entre los límites determinado por la precisión del instrumento.



Figura 82 **Relación medida real-lectura instrumento descalibrado**



#### **5.4 Ajuste de transmisores de presión luego de la calibración**

Los instrumentos pueden ajustarse para corregir los errores encontrados durante su calibración, si bien hay que señalar que algunos instrumentos, por su tipo de construcción, no pueden tener error de angularidad. La combinación de estos errores (error de cero, error de multiplicación y error de angularidad) dan lugar a una curva de relación medida real-lectura como la representada en la figura 83.

##### **5.4.1 Ajuste del cero**

En general, el error de cero se corrige con un tornillo de cero, en el caso de los instrumentos que así lo tienen, o un botón de cero para el caso de los transmisores más modernos, que en ambos casos modifica directamente la posición de la indicación y/o variable de salida (4 mA cc) cambiando la curva variable-lectura paralelamente a sí misma.

Un ajuste del cero es un ajuste de punto simple que también puede ser usado para compensar la posición del montaje. Al efectuar un ajuste del cero, debe asegurarse de que la válvula de compensación (si es que está incluida) se encuentre abierta.

El ajuste de transmisores de presión puede hacerse de la siguiente forma:

- Haciendo uso de una fuente de presión de calidad apropiada, aplicar al transmisor una presión equivalente al valor del rango inferior deseado. Si se trata de cero, asegurarse de que los dos puertos de presión [alta (H), y baja (L)] se encuentren a la misma presión.
- Hacer presión al botón de cero durante un mínimo de dos segundos pero sin exceder de diez. Esto aplica para la mayoría de las marca existentes en el mercado.

#### **5.4.2 Ajuste de multiplicación**

El error de multiplicación se corrige actuando sobre el tornillo o botón de multiplicación (*span*), dependiendo del caso, que modifica directamente la relación de amplitud de movimientos de la variable al valor de la variable de salida, es decir, que aumenta o disminuye progresivamente las lecturas sobre la escala.

El ajuste de transmisores de presión puede hacerse de la siguiente forma:

- Haciendo uso de una fuente de presión de calidad apropiada, aplicar una presión equivalente al valor del rango superior deseado.

- Hacer presión al botón de *span*, durante un mínimo de dos segundos pero sin exceder de diez.

Es importante tomar en cuenta reajustar el cero y la multiplicación, hasta conseguir la exactitud deseada o requerida.



## CONCLUSIONES

1. Los transmisores de presión basan su funcionamiento en los principios de conversión de energía, que gracias a transductores de alta precisión y aplicaciones de algunas leyes de los circuitos eléctricos como de la física de los semiconductores y otras de la mecánica de los fluidos, ciencia de los materiales y un tanto de metalurgia, transforman una deformación causada a un diafragma por un diferencial de presión, en una forma de energía que aplicada a un piezo transductor, se convierte en otro tipo, luego se amplifica gracias a un grupo de semiconductores convirtiéndola a una señal eléctrica normalizada de 4 – 20 mA DC.
2. Los tipos de transmisores de presión que encontramos en el mercado pueden clasificarse en absolutos, manométricos y de presión diferencial, los cuales pueden utilizarse para la medición de vacío, presión manométrica y diferenciales de presión respectivamente, todos en una amplia gama de características constructivas que los adecuan a cada proceso, bajo ciertas limitantes como su sensibilidad a los cambios de temperatura, al ruido, y a la vibración; condiciones específicas de montaje y errores intrínsecos como corrimiento de cero, histéresis y en algunos casos repetibilidad y precisión bajas.
3. La presión de un fluido contenido en un recipiente abierto puede ser medida fácilmente por un transmisor manométrico, si este recipiente es cerrado puede hacerse con un diferencial.

4. La diferencia de presión ocasionada por una obstrucción en una tubería donde circula un fluido es proporcional a su velocidad por lo que al medir esta con un transmisor de presión diferencial puede determinarse con cierta precisión el flujo volumétrico y hasta másico del mismo cuando la medición es compensada.
5. Todas las aplicaciones que están a una presión menor a la atmosférica se consideran aplicaciones en vacío, mismo que puede medirse con un transmisor de presión que abarque rangos de presión tan bajos, estos transmisores son llamados de presión absoluta.
6. El buen funcionamiento de un elemento de medición depende primordialmente de las características mecánicas y eléctricas del mismo, las cuales deben ser escogidas de acuerdo a la aplicación, ya que deben soportar todas las condiciones intrínsecas del proceso.
7. Los transmisores de presión trabajan bajo la combinación de principios eléctricos y mecánicos, tales como los postulados de Faraday, Ohm, Ampere, puentes de medición, así como el Teorema de Bernoulli, Ley de Continuidad, Principio de Pascal, Ley de empuje, como una aplicación de la física de los semiconductores y la mecánica de los fluidos, lo que permite que las señales de campo (presión), puedan ser convertidas a señales normalizadas (4 – 20 mA DC y 3 – 15 psi).

8. Existen diversas marcas y aun mayor cantidad de aplicaciones para los transmisores de presión, pero todas se reducen a los mismos principios de funcionamiento y condiciones de montaje y operación, radicando la mayor diferencia en la clase de precisión que unas pueden manejar respecto a otras y los beneficios adicionales que algunos fabricantes agregan a sus equipos.
9. La medición de variables como flujo, nivel y presión debe enfocarse de acuerdo a la aplicación, tomando en cuenta la precisión requerida y fundamentalmente las condiciones y limitantes de los procesos tales como caídas de presión, condiciones de montaje, protocolos de comunicación y tipos de fluidos.
10. Como parte de una planificación proactiva deben seleccionarse los equipos tomando en cuenta la posible integración de los mismos a un sistema de control distribuido que permita a corto o mediano plazo la automatización del proceso.
11. La buena elección de un instrumento depende en buena parte de contar con el personal capaz y con el conocimiento de las aplicaciones para brindar asesoría necesaria sobre los equipos.



## RECOMENDACIONES

1. Debe hacerse una revisión al programa de los cursos de instrumentación y automatización industrial de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, para que sean tomados en cuenta los principios básicos de medición de variables de campo y la descripción de los equipos más comunes que existen el mercado.
2. Para aplicaciones muy críticas o de condiciones que no se especifican en una hoja de datos técnicos de un fabricante, deben realizarse consultas a fabrica brindándole la mayor cantidad de información posible, para que el personal de esta pueda hacer una buena sugerencia y dar las mejores recomendaciones, garantizando así el correcto funcionamiento de sus equipos.
3. El estudio de los elementos primarios para la medición de presión en sistemas de automatización de procesos debe ser caso de estudio y se sugiere ahondar en el mismo, tomando en cuenta que mientras mas amplio es el conocimiento mayor será la certeza de una buena especificación para una aplicación definida.
4. Existen diversos protocolos de comunicación que en poco tiempo comenzaran a tomar mayor importancia de acuerdo a la tendencia de los fabricantes y la industria en general, de manera que es importante el conocimiento de los mismos, para que no se tenga que contratar mano de obra extranjera para la puesta en operación de nuevos equipos con estos protocolos.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Creus Solé, Antonio. Instrumentación Industrial. 6ta ed. México: Editorial McGraw Hill Marcombo, 1998.
2. Poblete, Carolina y otros. Seminario de Medidores de Caudal. (Departamento de Industria y Negocios) Chile: Universidad de Atacama, 2000. 38 pp.
3. Manual de Medidores de Flujo. (ABB Inc. Versión 1.04), Warmister: s.e. 2004.
4. Manual de Medidor Tipo Wedge (ABB Inc. Versión 1.04), Warmister: s.e. 2004. 34 pp.
5. Teoría Básica del Transmisor (ABB Inc. ), Warmister: s.e. 2003. 53 pp.
6. Piñón Pasos, Andrés J. Implementación de Sensores Virtuales en Foundation Fieldbus. (Dpto. Ingeniería Industrial, Universidad de La Coruña. E.U.P). España: s.e. s.a. 5 pp.
7. Especificaciones Medidor Tipo Cono. (Nuflo Measurement Systems) s.l. s.e. s.a. 4 pp.
8. Guía Técnica Sobre Trazabilidad E Incertidumbre En Los Servicios De Calibración De Manómetros, Transductores Y Transmisores De Presión De Elemento Elástico, México: 2004. 23 pp.