



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA

USO ALTERNATIVO DE SENSORES PARA LA  
MEDICIÓN DE VARIABLES SOBRE UN  
DETERMINADO PROCESO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

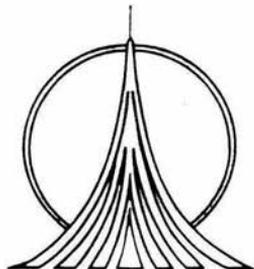
INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A :

JOSE MARTIN ORTIZ ACOSTA

ASESOR: I.Q. EDUARDO VAZQUEZ ZAMORA.

NOVIEMBRE DE 2003





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA**

**OFICIO: FESZ/JCIQ/047/03**

**ASUNTO: Asignación de Jurado**

**ALUMNO: ORTIZ ACOSTA JOSÉ MARTÍN**  
**P r e s e n t e.**

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

<b>Presidente:</b>	<b>I.Q. Eduardo Vázquez Zamora</b>
<b>Vocal:</b>	<b>I.Q. José Luis Macías Pérez</b>
<b>Secretario:</b>	<b>I.Q. Miguel Angel Varela Cedillo</b>
<b>Suplente:</b>	<b>I.Q. Espiridión Muñoz Rivera</b>
<b>Suplente:</b>	<b>I.Q. Balbina Patricia García Aguilar</b>

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

**A T E N T A M E N T E**  
**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”**  
México, D. F., 11 de Abril de 2003

**EL JEFE DE LA CARRERA**

**M. en C. ANDRÉS AQUINO CANCHOLA**

## AGRADECIMIENTOS:

A KAREN MICHELLE: Porque sin duda eres el motivo más grande que me impulsó para seguir adelante y porque eres la razón de mi existencia.

A MI S PADRES: Porque sin su apoyo y cariño no lo hubiera logrado.

A MIS AMIGOS: Por todo el apoyo moral que me brindarán para seguir adelante.

AL PROFR.: EDURADO VAZQUEZ: Por la ayuda y fortaleza que me brindó para sobreponerme a los momentos difíciles y a la elaboración de esta Tesis.

Se agradece por el apoyo otorgado para la realización de este trabajo a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) en el Programa de Apoyo Proyectos Institucionales para el Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME) en el Proyecto No. EM108603.

## INDICE

CONTENIDO	PAG.
INDICE DE FIGURAS.....	3
INDICE DE TABLAS.....	5
OBJETIVO E INTRODUCCIÓN.....	6
CAPITULO 1. GENERALIDADES.....	9
1.1 Historia y fundamentos del control de procesos por computadora.....	10
1.2 La automatización en la industria de procesos.....	11
1.3 Tecnologías del control de procesos.....	12
1.4 Evolución del control de procesos.....	13
1.5 Necesidad y objetivo del control de procesos.....	15
1.6 Clases de control en los procesos.....	16
1.6.1 Regulación.....	17
1.6.2 Control secuencial.....	17
CAPITULO 2 SENSORES Y MEDICIONES.....	18
2.1 Clasificación de los sensores.....	19
2.2 Interferencias y perturbaciones internas.....	22
2.3 Técnicas de compensación.....	22
2.4 Características estáticas de los sistemas de medida.....	23
2.4.1 Exactitud, fidelidad y sensibilidad de un sensor.....	24
2.4.2 Linealidad y resolución.....	27
2.4.3 Errores sistemáticos.....	28
2.4.4 Errores aleatorios.....	28

2.5 Características dinámicas de los sistemas de medida.....	30
2.5.1 Sistemas de medida de orden cero.....	31
2.5.2 Sistemas de medida de primer orden.....	32
2.5.3 Sistemas de medida de segundo orden.....	35
2.6 Características de entrada: impedancia.....	35
2.7 Sensores primarios.....	39
2.8 Sensores de presión.....	39
2.9 Sensores de flujo.....	42
2.10 Sensores de nivel.....	48
2.11 Sensores de temperatura.....	51
3 ECUACIONES QUE PERMITEN EL USO ALTERNATIVO DE SENSORES.....	57
3.1 Sensores de temperatura.....	58
3.2 Sensores de nivel.....	59
3.3 Sensores de flujo.....	61
3.4 Sensores de presión.....	66
4 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SOBRE SENSORES.....	68
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	85
6 BIBLIOGRAFIA.....	87

### INDICE DE FIGURAS

Nombre y número de la figura.	Página
2.1 Esquema que representa el método de retroacción negativa.....	23
2.2 Ejemplo de la aplicación de un potenciómetro empleado para la medida de desplazamientos lineales y angulares.....	31

2.3 Esquema de un sensor de tipo tubo de Bourdon sencillo.....	39
2.4 Imagen de un tubo de Bourdon helicoidal.....	40
2.5 Imagen de un tubo de Bourdon de tipo espiral.....	40
2.6 Esquema del tubo de Bourdon de espiral.....	41
2.7 Imagen de un tubo de Bourdon de fuelle.....	41
2.8 Esquema de un tubo de Bourdon fuelle.....	41
2.9 Imagen de un tubo de Bourdon de diafragma.....	42
2.10. Esquema de las partes de un tubo de Bourdon de diafragma.....	42
2.11. Imágenes de los medidores de orificio: a) De filo agudo, b) Filo de cuadrante, c) Filo de segmento, y d) Filo excéntrico.....	43
2.12. Imágenes de medidores de orificio de espitas laterales: a) Con unión de rosca, b) Con unión deslizable, c) Con unión soldada.....	43
2.13 Ilustración de un medidor de flujo de espitas de vena contracta.....	44
2.14. Imágenes de diferentes sensores y transmisores de diferencial de presión	45
2.15. Imagen de un medidor magnético de flujo.....	47
2.16. Ilustración de un medidor de flujo de turbina:.....	48
2.17. Imágenes de instalación de Transmisores de diferencial de presión en recipientes abiertos y cerrados.....	49
2.18. Imagen de un sensor de nivel con flotador.....	50
2.19. Figura de un sensor de nivel de burbujeo.....	50
2.20. Ilustración de un termómetro típico de tira bimetalica.....	52
2.21. Ilustraciones de termómetros de sistema lleno.....	53
2.22. Esquema de los termómetros de resistencia. a) De ensamblaje, b) De componentes.....	54
2.23. Imagen de un Termistor típico.....	54

2.24. Esquema de un circuito de termopar sencillo.....	55
2.25. Imágenes del ensamblaje de los sistemas de termopar.....	55
2.26. Circuito para la medición con un termopar.....	56

### INDICE DE TABLAS

Nombre y número de tabla.	Pagina
1.1 Tabla de las diferencias de automatización en los procesos de producción y los de fabricación.....	12
1.2 Tabla de las diferencias entre los dos tipos de actuaciones de control.....	16
2.1 Tabla de la clasificación de sensores de acuerdo al número de elementos almacenadores de energía.....	21
2.2 Clasificación general de sensores. ....	21
2.3 Tabla de la expresión de la señal de salida para cada una de las entradas más frecuentes (escalón, rampa y senoide).....	32
2.4 Tabla de resumen del error dinámico y retardo para un sistema de primer orden.....	33
2.5 Tabla de las características que se deben tener en cuenta para elegir un sensor.....	38

**OBJETIVO  
E  
INTRODUCCION**

## **OBJETIVO**

Se analizarán las ecuaciones fundamentales que rigen a los principales sensores en la industria química, así como su aplicación. Esto con la finalidad de encontrar la forma o metodología más adecuada para medir las variables de proceso, en caso de falla de algún sensor empleando para esto un sensor alternativo que permita dicha medición.

## **INTRODUCCION**

### **USO ALTERNATIVO DE SENSORES PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES SOBRE UN DETERMINADO PROCESO**

En el control automático de procesos es de vital importancia conocer nuevas alternativas en la medición de las variables que participan, para esto se emplean los sensores; que son el primer elemento y quizá el más importante en los sistemas de control, los demás elementos que se utilizan son: los transmisores, los controladores y los elementos finales de control. Un sensor es un dispositivo donde se produce un fenómeno mecánico, eléctrico o similar, el cual se relaciona con la variable de proceso que se mide. El transmisor se encargará de convertir este fenómeno en una señal que será transmitida al controlador. Los sensores que analizaremos son los más importantes en la industria química: los de nivel, los de presión, los de temperatura y los de flujo.

Lo más importante al hablar de los sensores son las ecuaciones que rigen a cada uno de ellos, ya que por medio de éstas, se puede hacer un uso alternativo de sensores para medir las variables del proceso en el caso de que alguno de éstos llegara a fallar.

Al analizar los antecedentes del control de procesos, encontramos los fundamentos para poder seguir innovando y tratando de mejorar continuamente en este rubro, para esto se debe tener en cuenta principalmente: la necesidad y los objetivos del control de procesos, la automatización en la industria de procesos, las tecnologías más actuales, el como ha evolucionado el control de procesos, y finalmente las clasificaciones principales que pueden hacerse del control automático de procesos. El control de procesos como su nombre lo indica permite intervenir para controlar el proceso en el instante exacto en el que se requiera una acción ya sea de corrección o bien de regulación

Para llegar a entender mejor el uso y las aplicaciones de los sensores en la industria química es necesario realizar un análisis detallad de cada uno de ellos, ya que esto nos dará la posibilidad de determinar las variables del proceso en cualquier instante del mismo. A continuación se hablara de manera muy general sobre los principales sensores de los que trata el presente trabajo.

Los sensores de temperatura se clasifican en cuatro grupos que son: los termómetros de expansión, los termómetros de dispositivos resistivos, los termopares y los sensores de métodos sin contacto. En el capítulo 2 se presentan los principales sensores de temperatura en la industria química así como algunas de sus características más importantes.

En los sensores de presión los principales que se conocen son los de Bourdón y los de fuelle, aunque también se analizan sensores como el de diafragma que tiene gran relevancia en la industria.

Los principales sensores de nivel son: el de diferencial de presión, el de flotador y el de burbujeo. Y también son descritos en el capítulo número 2. Al realizar un análisis sobre las posibilidades que existen de medir el nivel en un recipiente cuando el sensor de nivel llega a fallar, es ya conocido que puede realizarse por medio de sensores de presión, cabe mencionar que esto en realidad es ya una práctica común en la industria.

También tenemos los sensores para medir flujo donde los principales son: los medidores de orificio, medidores magnéticos y el medidor de turbina. Como sabemos el flujo es una de las dos variables junto con la temperatura que más comúnmente se miden en la industria de procesos. Lo cual da como resultado una gran variedad de sensores de este tipo en la industria

Existen muchos otros tipos de sensores de medición, por ejemplo, los de densidad, viscosidad, cromatografía y pH. Así como los sensores de composición, los cuales se utilizan en las mediciones y control de calidad del producto. Para efecto de este trabajo no trataremos sobre estos sensores.

**CAPITULO 1**  
**Generalidades**

## **I GENERALIDADES**

### ***1.1 Historia y fundamentos del control de procesos por computadora.***

El control de procesos empleando una computadora es parte de la evolución de la tecnología que como se sabe cada día logra un adelanto y una madurez que permiten el desarrollo de muchos de los ámbitos de la vida, así como por ejemplo del trabajo industrial.

Al hablar del control de procesos empleando la computadora debemos dar prioridad a algo que conocemos como "Automatización" y que no es más que la realización mediante maquinas de funcionamiento autónomo, sin intervención del hombre, de tareas y funciones antes encomendadas a éste.

A través de las máquinas, el hombre aumenta su capacidad para hacer cosas a la vez que descarga sobre ellas aquellas actividades que pueden considerarse menos propias del ser humano, como por ejemplo; el esfuerzo la potencia y la repetición sin variaciones, reservando para el las actividades más creadoras, es decir aquellas donde es importante el uso de la inteligencia. La automatización es importante desde el hecho de que las máquinas asumen la parte más dura del trabajo, la menos inteligente, y por lo tanto, la menos humana. Además, en la actividad industrial esta importancia tiene también un fundamento económico por su conexión con la productividad. La situación de la economía a todos los niveles exige disponer de una industria competitiva y para conseguirlo, hay que disminuir el costo de los productos y mejorar su calidad. Ambas cosas requieren la sustitución del hombre por la máquina.

La historia de la automatización es pues la de este reparto de trabajos que, al fin y al cabo, constituye la historia del progreso de la humanidad.

La automatización en la industria no es algo reciente. Desde que la actividad industrial sustituyó a la artesanal, el hombre ha procurado obtener el máximo rendimiento del trabajo mediante la acción combinada de: herramientas, máquinas y organización. Sin embargo, aunque con distinta incidencia sobre los diferentes sectores industriales, este proceso de automatización ha estado sometido a una creciente aceleración basada en nuevas teorías, inventos y tecnologías reduciéndose cada vez más el intervalo transcurrido entre el hallazgo y su aplicación industrial.

En las últimas décadas esta aceleración ha crecido con tal rapidez, que en los últimos años, se ha dado una auténtica explosión. En la década de los 40, la teoría del Control Automático y la Electrónica vienen a revolucionar la industria, cuya automatización hasta entonces se apoyaba en la mecánica, la hidráulica, la neumática y la electromecánica.

Con las primeras computadoras se da un salto cualitativo en la industria al desarrollo de la electrónica digital. Al comienzo de los 70, la expansión de la informática y la aparición de los microprocesadores suponen un nuevo impulso que permite la aplicación de la automatización a nuevas tareas y la potenciación de máquinas extraordinariamente necesarias, como los controladores lógicos programables, los reguladores multibucle y los robots, entre otros.

### **1.2 La automatización en la industria de procesos.**

La automatización puede aplicar, prácticamente, en todo lo que el hombre considera como trabajo. Sin embargo, no será la misma para todo, pues por ejemplo, la automatización de las actividades de gestión, económicas y administrativas, que se dan en el sector de servicios (como la existente en bancos, hoteles o en la misma administración Pública), es completamente distinta de la necesaria en una instalación industrial.

Pero, incluso dentro de la industria, hay dos tipos muy distintos y con problemas diferentes en los que su automatización ha evolucionado a ritmos también dispares.

Por un lado, tenemos la industria con procesos de tipo continuo (se trabaja realmente de forma continua o por coladas u hornadas, "batch"). Estos procesos son básicamente de tipo químico y se conocen como procesos de producción o simplemente "procesos".

Por otro, están los de tipo discontinuo, en los que se trabaja sobre piezas discretas, independientes entre sí, que luego se unen para obtener equipos o sistemas. Es la industria de los procesos de fabricación, o la industria de "fabricación".

En los "procesos", las materias que se manipulan son gases o líquidos, y, cuando no es así, no se opera sobre unidades individuales, sino sobre un flujo de producto.

Esta diferencia es esencial con los "procesos de fabricación" que trabajan sobre cada pieza o unidad, con tratamiento individual y a ella se debe que la automatización de ambos tipos, haya tomado hasta hoy rumbos y ritmos distintos.

Solamente con la llegada de los robots y de lo que se conoce como automatización flexible, ha sido posible dar el salto en la automatización de una tarea concreta con una máquina particular para una pieza determinada, dentro del conjunto de las operaciones de una instalación para una gama de piezas relativamente amplia. Todo ello se ha basado en el servocontrol de posición para controlar los movimientos.

CARACTERISTICA	PROCESOS DE PRODUCCIÓN	PROCESOS DE FABRICACIÓN
Entradas por sensores	Fuente principal de información Valores de variables	Fuente secundaria de información
Entradas de origen humano	Fuente secundaria de información Consignas	Fuente principal de información, diseños, ordenes, estado de trabajo
Base de datos	Escasa	Muy grande, siempre creciente, y clave para el sistema
Técnica de control	Realimentación y Prealimentación: bucles, ganancias, dinámica muy importante	Manipulación, actualización y suministro de grandes volúmenes de información
Equipo de control	Reguladores	Controladores lógicos programables
Interfaces de salida	Estaciones de consigna, Válvulas	Plotters, máquinas-herramienta, robots, equipos de ensayo automático
Impacto socioeconómico laboral	Modesto	Muy grande
Época de desarrollo	1960-1975	1975-1990

Tabla 1.1 Diferencia de automatización en los procesos de producción y los de fabricación.

### 1.3 Tecnologías del control de procesos por computadora.

No debemos olvidar que el control de procesos por computadora es, como hemos dicho, el fruto de la integración de los logros de diversas disciplinas y tecnologías, siendo muy difícil señalar la más importante, al jugar todo un papel destacado, aparte de su mutua dependencia. Algunas de las más relevantes son:

- Electrónica: Incluyendo microelectrónica, técnicas de medida y tratamiento de señales, interfaces y redes de comunicación, instrumentación y analizadores.

- Ingeniería de procesos y conocimiento de su dinámica.
- Teoría de control automático: En la que se incluyen los métodos matemáticos correspondientes.
- Informática: Software y Hardware a la vez; unidades centrales, memorias y todo tipo de periféricos: discos, impresoras, pantallas gráficas y lenguajes, sistemas operativos, ingeniería del software y técnicas de programación.
- Dispositivos de actuación: Válvulas, motores, etc.

#### **1.4 Evolución del control de procesos.**

Anteriormente al siglo XX ya se había planteado el problema del mando de los procesos de forma automática, llegándose en algunos casos a soluciones asombrosas para la época. El ejemplo más conocido es el llamado Controlador de Watt, para el dominio de una máquina de vapor.

Sin embargo, durante mucho tiempo, el control se llevó a cabo de una forma totalmente manual o humana.

Aún hoy se encuentra este tipo de "control" en algunas actividades artesanales (alfareros, forjadores, etc.). Donde los sentidos del operario miden la evolución del proceso para eliminar los posibles disturbios, checando que las medidas tomadas tengan el efecto esperado. A este modo de trabajar se le conoce como "by-guess-and-by-golly" (por adivinación y salivazo), este procedimiento es en muchos casos satisfactorio para lo que se pretende y se le llama así por que antiguamente así se controlaban los hornos en las fabricas de porcelana: el operario escupía sobre el horno y, si la saliva no se evaporaba inmediatamente, significaba que había que agregar más combustible.

Este control manual depende totalmente de la apreciación subjetiva del operario con las consiguientes variaciones en la calidad del producto resultante.

La etapa siguiente de evolución se presenta a partir de los dispositivos de medida y grabación. Con los primeros se obtiene información exacta, rápida, consistente y siempre igual en las mismas condiciones. Los segundos informan de la evolución, evitando la anotación continua. Sin embargo, el modelo del comportamiento deseado todavía no esta formalizado y la comparación entre éste y los resultados dados por las medidas, sigue haciéndola el operario, al igual que la ejecución de las correcciones necesarias.

Para que el mando se realice de forma realmente automática es preciso "sustituir al hombre" (el liveware, como algunos han dado en llamarle frente al software, hardware, firmware...) por un dispositivo físico, que automáticamente realice las tareas de comparación y producción de acciones correctoras.

El operador se ocupa entonces de establecer el patrón de comportamiento con el que ha de compararse (en la fase de puesta en marcha principalmente), para fijar la manera en que el dispositivo debe de tomar la acción correctora.

Toda la evolución en el control de procesos tuvo lugar a través de un largo transcurrir del tiempo. Los dispositivos empleados eran básicamente neumáticos o mecánicos. Aunque el control era todavía un arte basado en la intuición, las consideraciones eran principalmente cualitativas más que cuantitativas y las diferentes partes del proceso se median y controlaban independientemente. El conocimiento era aún muy escaso y el control se consideraba teniendo en cuenta, únicamente, los equipos y la instrumentación.

El cambio se da durante la segunda guerra mundial, al ser necesarios los sistemas de control. Los trabajos de Nyquist, Black, Rynorslay y otros, basados en el estudio del comportamiento en el dominio de la frecuencia por haberse desarrollado en la teoría de circuitos, empiezan a construir un cuerpo teórico en si mismos, conocido como teoría de servomecanismos o de control por retroalimentación, que se intenta aplicar al estudio del control de otros sistemas, tales como los procesos de producción.

Simultáneamente prosiguen los estudios (como los de campbell), sobre la dinámica de los procesos, y todo ello permite plantear el control de procesos por vez primera sin considerar únicamente la instrumentación, sino tomando en cuenta, además, el conjunto de proceso-instrumentación y proceder al diseño de los sistemas de control de procesos con técnicas cuantitativas.

A partir de este momento, la evolución continúa con ritmo creciente, incorporando, no sólo los estudios teóricos del control, la optimización y la dinámica de los procesos, sino también los avances en equipos como: **sensores**, controladores, electrónica, computadores y microprocesadores, según van apareciendo.

Hacia la década de los cincuenta aparecen los primeros computadores empleados para el control de procesos trayendo la tendencia de concentrar todos los controladores o reguladores en un solo lugar, con lo que se tiene el control centralizado, de modo que un operario puede vigilar el funcionamiento de diferentes magnitudes de un proceso o de varios procesos independientes de una fábrica. Cuando se emplea un computador, éste puede desempeñar el papel de varios controladores, para vigilar simplemente el funcionamiento de éstos, o incluso a fijarles las referencias. La llegada del computador hace que los controladores incluyan la posibilidad de ser gobernados por aquél como una opción.

Finalmente, con la entrada del microprocesador y su generalización, la potencia, flexibilidad y capacidad de decisión del computador se reparten por toda la fábrica, con las consiguientes ventajas de fiabilidad y aumento de potencia. Estamos, pues, ante el control de procesos distribuido.

### **1.5 Necesidad y objetivo del control de procesos.**

Incluyendo los sistemas de control de procesos centralizados, pero que no poseen un computador, tienen una serie de inconvenientes muy importantes:

- Hay una falta de integración, ya que no se controla el proceso como un todo.
- Los resultados dependen en gran medida del operador. El almacenamiento y tratamiento de los datos es molesto, costoso y lento.
- No se puede optimizar el funcionamiento de la fábrica buscando alcanzar objetivos económicos.
- Debido a la lentitud de la respuesta de un operador humano, hay un gran riesgo de trabajar en condiciones de servicio no tolerables e incluso peligrosas.

Estos inconvenientes se solventan, casi en su totalidad, con el empleo de computadoras que automatizan el control de los procesos. La computadora proporciona:

- Una gran velocidad de procesamiento de la información.
- Una gran capacidad de almacenamiento de información.
- Posibilidad de toma automática de decisiones.

Para esto, la computadora se hace cargo de:

- El tratamiento y la vigilancia de los datos.
- En algunos casos, el control digital directo.
- El control supervisor y el control del programa.
- El control de optimización de la instalación.

La introducción de la computadora tiene por objetivos (y en función de cómo los alcanza, así se justifican) aumentar la productividad y homogeneidad del producto, lo que, en el fondo, también se traduce en beneficio económico notable, por menor precio del producto y mejor utilización de las materias primas. En cuanto a la productividad, puede medirse por varios índices siendo los más utilizados, el valor del producto por unidad de inversión, por trabajo realizado o por materias primas empleadas. Se puede considerar al conjunto de los tres como el índice más representativo.

### **1.6 Clases de control en los procesos.**

Desde el punto de vista del control se pueden considerar dos tipos muy diferentes de actuaciones. El primero trata del valor que han de tomar las variables del proceso, haciendo que su evolución siga un determinado comportamiento, o manteniendo un valor deseado, es la "Regulación". Y el segundo, se fija en la generación de señales, que normalmente son de tipo binario para el mando de las etapas o acciones del proceso, en función de la combinación, temporizado y/o secuenciado, de otras acciones de este y se le conoce como "Control secuencial".

ATRIBUTO	REGULACION	SECUENCIADO
Parámetros a controlar	Valor de las variables	Lógica de variables Combinación, secuenciado y temporización
Valores	Continuos	Binarios, discretos
Equipo	Regulador	Controlador lógico programable
Modelado	Ecuaciones físicas, dinámica del sistema, función de transferencia, gráficos de Bond	Redes de Petri, Grafcet y máquinas de estado finito
Cálculo	Ajuste de parámetros del regulador y determinación de la estructura del regulador	Cálculo combinatorial y secuencial

Tabla 1.2 Diferencias entre los dos tipos de actuaciones de control.

### **1.6.1 Regulación.**

La regulación es el núcleo, el alma de la teoría del control automático, que es, a su vez, la teoría matemática en que se apoya la automatización. Sus principios y resultados se aplican continuamente en la industria y en la vida diaria para conseguir que el funcionamiento de máquinas, equipos y dispositivos, se realice según lo establecido. Se dice que la regulación es uno de los principios básicos de la vida.

Así como la inercia, que no es otra cosa que la expresión física del principio vital de la resistencia al cambio, a cualquier cambio de situación, y para que se produzca ese cambio hace falta realizar un esfuerzo, la regulación es la formalización y reducción a ecuaciones del principio del aprendizaje y la corrección por la experiencia. Antes de su formulación matemática y de sus técnicas de utilización, ya se había utilizado en la práctica: el primer trabajo notable fue el regulador centrífugo de Watt para controlar la velocidad de una máquina de vapor.

### **1.6.2 Control secuencial (secuenciado)**

Se ha presentado a la regulación como un elemento básico del control de procesos. Sin embargo, se ha indicado que no es la única técnica que se utiliza. Hay otro tipo de problemas en los que no interesa tanto que las variables mantengan un valor frente a las alteraciones exteriores o sigan perfectamente una evolución prefijada, sino el que el conjuntote acciones posibles se ejecute de acuerdo con una secuencia dada, teniendo en cuenta, a la vez, estados internos y situaciones externas. Anteriormente, se ha hecho una comparación de las características de la regulación y de este otro tipo de control, conocido como Control Secuencial o simplemente Secuenciado.

El control secuencial y las herramientas que utiliza para definir los problemas, no sólo tiene utilidad en la descripción de automatismos lógicos sino que están íntimamente ligados con el desarrollo de la informática. Su sistematización y evolución se ha debido al esfuerzo investigador realizado en este último campo, sin el cual, el control secuencial estaría todavía más primitivo que la regulación.

**CAPITULO 2**  
**Sensores y mediciones**

## SENSORES Y MEDICIONES

### *Introducción.*

En este capítulo se analizan los cálculos y procedimientos necesarios para demostrar que es posible la utilización alternativa de sensores al ocurrir una falla en alguno de los más importantes de un proceso. Para ello comenzaremos describiendo los tipos de sensores más utilizados en la industria, así como sus características principales. Finalmente enunciaremos las ecuaciones fundamentales que rigen a cada uno de los sensores principales en la industria química ya que gracias a ellas es posible la utilización y evaluación de todas las variables del proceso.

### *2.1 Clasificación de sensores.*

El número de sensores disponibles para las distintas magnitudes físicas es tan elevado que no podemos proceder racionalmente a su estudio sin haberlos clasificado previamente de acuerdo con algún criterio. Se habla de sensores de temperatura, presión, caudal, humedad, posición, velocidad, aceleración, fuerza, par, etc. Sin embargo, esta clasificación difícilmente puede ser exhaustiva ya que la cantidad de magnitudes que se pueden medir es prácticamente inagotable. Los sensores a analizar en este trabajo son principalmente los sensores de presión, los sensores de flujo y los sensores de temperatura.

Según el aporte de energía, los sensores se pueden dividir en **moduladores** y **generadores**. En los sensores moduladores o activos, la energía de la señal de salida procede, en su mayor parte, de una fuente de energía auxiliar. La entrada solo controla la salida. En los generadores o pasivos, en cambio, la energía de salida es suministrada por la entrada.

Los sensores moduladores requieren en general más hilos que los generadores, ya que la energía de alimentación suele suministrarse mediante hilos distintos a los empleados para la señal. Además, esta presencia de energía auxiliar puede crear un peligro de explosiones en algunos ambientes. Por el contrario, su sensibilidad se puede modificar a través de la señal de alimentación, lo que no permiten los sensores generadores.

De acuerdo al tipo de señal a la salida, los sensores se clasifican en **analógicos** o **digitales**. En los analógicos la salida varía, a nivel macroscópico, de forma continua. La información está en la amplitud, si bien se suelen incluir en este grupo los sensores con salida en el dominio temporal. Si es en forma de frecuencia, se denominan, a veces «casidigitales», por la facilidad con que se puede convertir en una salida digital.

En los sensores digitales, la salida varía en forma de saltos o pasos discretos. No requieren conversión A/D y la transmisión de su salida es más fácil. Tienen también mayor fidelidad y mayor fiabilidad, y muchas veces mayor exactitud, pero lamentablemente no hay modelos digitales para muchas de las magnitudes físicas de mayor interés.

De acuerdo con el modo de funcionamiento, los sensores pueden ser de **deflexión** o de **comparación**. En los sensores que funcionan por deflexión, la magnitud medida produce algún efecto físico, que engendra algún efecto similar, pero opuesto, en alguna parte del instrumento, y que esta relacionado con alguna variable útil. Un dinamómetro para la medida de fuerzas es un sensor de este tipo en el que la fuerza aplicada deforma un muelle hasta que la fuerza de recuperación de éste, proporcional a su longitud, igual a la fuerza aplicada.

En los sensores que funcionan por comparación, se intenta mantener nula la deflexión mediante la aplicación de un efecto bien conocido, opuesto al generado por la magnitud a medir. Hay un detector del desequilibrio y un medio para restablecerlo. En una balanza manual, por ejemplo, la colocación de una masa en un platillo provoca un desequilibrio, indicado por una aguja sobre una escala. El operario coloca entonces una o varias masas en el otro platillo hasta alcanzar el equilibrio, que se juzga por la posición de la aguja. Las medidas por comparación suelen ser más exactas porque el efecto conocido opuesto se puede calibrar con un patrón o magnitud de referencia de calidad.

El detector de desequilibrio sólo mide alrededor de cero y, por lo tanto, puede ser muy sensible y no necesita estar calibrado. Por el contrario, tienen en principio menor respuesta dinámica y, si bien se pueden automatizar mediante un servomecanismo, no se logra normalmente una respuesta tan rápida como en los de deflexión.

Según el tipo de relación entrada-salida, los sensores pueden ser **de orden cero, de primer orden, de segundo orden o de orden superior**.

El orden está relacionado con el número de elementos almacenadores de energía independientes que incluye el sensor, y repercute en su exactitud y velocidad de respuesta. Esta clasificación es de gran importancia cuando el sensor forma parte de un sistema de control en lazo cerrado.

CRITERIO	CLASES	EJEMPLOS
Aporte de energía	Moduladores Generadores	Termistor Termopar
Señal de salida	Analógicos Digitales	Potenciómetro Codificador de posición
Modo de operación	De deflexión De comparación	Acelerómetro de deflexión Servoacelerómetro

Tabla 2.1. Tabla de la clasificación de sensores de acuerdo al número de elementos almacenadores de energía.

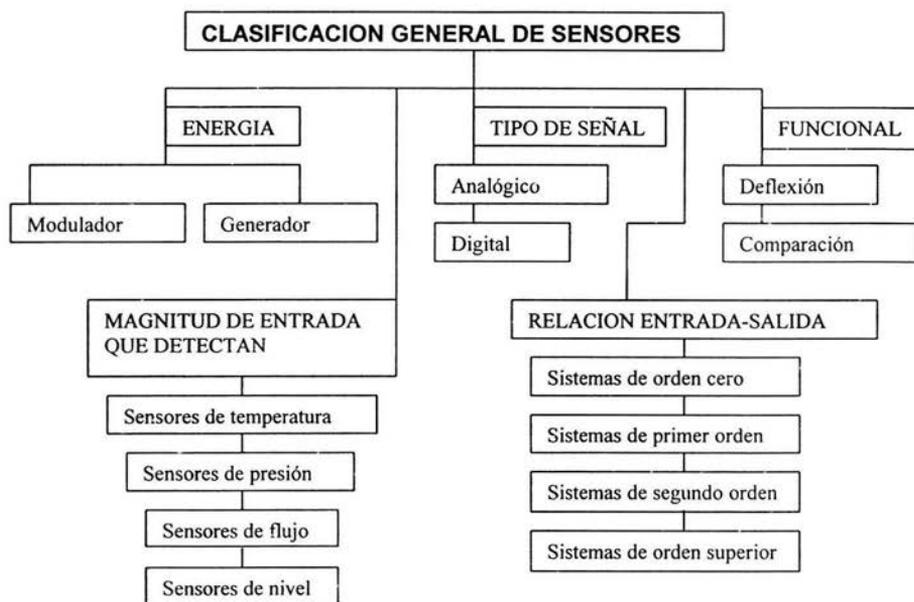


Tabla 2.2. Tabla de la clasificación general de sensores.

## **2.2 Interferencias y perturbaciones internas.**

En un sistema de medida, el sensor es el elemento dispuesto expresamente con la misión de obtener información, en forma de señal eléctrica, sobre la propiedad medida. Pero no sería razonable esperar, a priori, que por una parte el sensor respondiera exclusivamente a la magnitud de interés, y que por otra el origen de las señales de salida fuera únicamente la señal presente a la entrada.

La experiencia demuestra enseguida que esto no es así y, por lo tanto, conviene tener en cuenta esta realidad. Se denominan interferencias o perturbaciones externas aquellas señales que afectan al sistema de medida como consecuencia del principio utilizado para medir las señales de interés.

Las perturbaciones internas son aquellas señales que afectan indirectamente a la salida debido a su efecto sobre las características del sistema de medida. Pueden afectar tanto a las características relativas a la variable de interés como a las relativas a las interferencias.

## **2.3 Técnicas de compensación.**

Los efectos de las perturbaciones internas y externas pueden reducirse mediante una alteración del diseño o a base de añadir nuevos componentes al sistema. Un método para ello es el llamado diseño con **insensibilidad intrínseca**.

Se trata de diseñar el sistema de forma que sea inherentemente sensible solo a las entradas deseadas. En el caso de sensores que miden magnitudes mecánicas vectoriales, es el método aplicado para tener una sensibilidad unidireccional y una baja sensibilidad «transversal», es decir, en las direcciones perpendiculares a la de interés. Por razones prácticas obvias, este método no se puede aplicar en todos los casos. En el diseño de circuitos electrónicos, se aplica eligiendo resistores de película metálica y condensadores tipo NPO. Ambos tipos de componentes tienen un bajo coeficiente de temperatura.

El método de la **retroacción negativa** se aplica con frecuencia para reducir el efecto de las perturbaciones internas, y es el método en el que se basan los sistemas de medida por comparación.

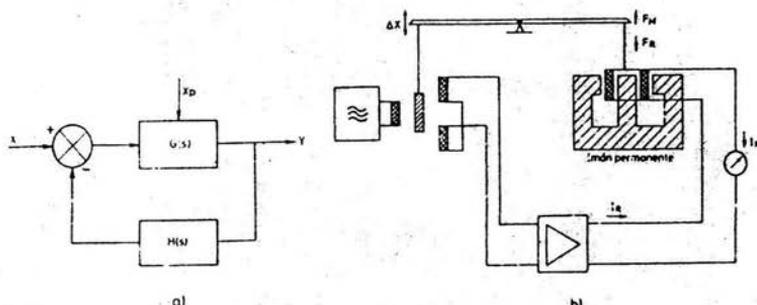


Figura 2.1. Esquema que representa el método de retroacción negativa.

Otra técnica para reducir las interferencias es el **filtrado**. Un filtro es todo dispositivo que separa señales de acuerdo con su frecuencia u otro criterio. Si los espectros frecuenciales de la señal y las interferencias no se solapan, la utilización de un filtro es efectiva. El filtro puede ponerse en la entrada o en una etapa intermedia. En el primer caso puede ser: eléctrico, mecánico —por ejemplo, para evitar vibraciones—, neumático, térmico —por ejemplo, un blindaje con masa apreciable para evitar los efectos de las turbulencias al medir la temperatura media de un fluido en circulación— o electromagnético. Los filtros dispuestos en las etapas intermedias son casi sin excepción filtros eléctricos.

Una técnica habitual de compensación de perturbaciones es la utilización de **entradas opuestas**. Se aplica con frecuencia para compensar el efecto de las variaciones de temperatura. Si, por ejemplo, una ganancia varía con la temperatura por depender de una resistencia que tiene coeficiente de temperatura positivo, puede ponerse en serie con dicha resistencia otra que varíe de forma opuesta (con coeficiente de temperatura negativo) y así mantener constante la ganancia a pesar de los cambios de temperatura.

También se aplica esta técnica en galgas extensométricas, en la alimentación de puentes resistivos, para compensar el coeficiente de temperatura de galvanómetros y para compensación de vibraciones en sensores piezoeléctricos.

#### 2.4 Características estáticas de los sistemas de medida.

El comportamiento del sistema de medida viene condicionado por el sensor empleado. Es por ello importante describir las características de los sensores. Sucede que, en la mayoría de los sistemas de medida, la variable de interés varía tan lentamente que basta con conocer las características estáticas del sensor.

Ahora bien, las características estáticas influyen también en el comportamiento dinámico del sensor, es decir, en el comportamiento que presenta cuando la magnitud medida varía a lo largo del tiempo. No obstante, se suele evitar su consideración conjunta por las dificultades matemáticas que entraña, y se procede a la distinción entre características estáticas y características dinámicas, estudiándose por separado. Los conceptos empleados para describir las características estáticas no son de aplicación exclusiva a los sensores, sino que son comunes a todo instrumento de medida.

#### **2.4.1 Exactitud, fidelidad, y sensibilidad.**

La exactitud (en inglés «accuracy») es la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de medida de dar indicaciones que se aproximen al verdadero valor de la magnitud medida. En castellano se emplea como sinónimo de exactitud el término precisión, pero en inglés americano «accuracy» y «precisión» no siempre se emplean como sinónimos.

El valor «exacto», «verdadero» o «ideal», es el que se obtendría si la magnitud se midiera con un método «ejemplar». Se considera como tal aquel método de medida en el que los expertos coinciden que es suficientemente exacto para la finalidad pretendida con los resultados que se obtengan.

La exactitud de un sensor se determina mediante la denominada calibración estática. Que consiste en mantener todas las entradas excepto una a un valor constante. La entrada en estudio se varía entonces lentamente, tomando sucesivamente valores «constantes» dentro del margen de medida, y se van anotando los valores que toma la salida. La representación de estos valores en función de los de la entrada define la curva de calibración. Para poder conocer el valor de la magnitud de entrada, ésta debe tener un valor bien conocido, constituyendo lo que se denomina un «patrón» de referencia. Su valor debe conocerse con una exactitud al menos diez veces mayor que la del sensor que los calibra.

La discrepancia entre la indicación del instrumento y el verdadero valor de la magnitud medida se denomina «error». La diferencia entre la indicación del instrumento y el verdadero valor se denomina error absoluto. A veces se da como porcentaje respecto al máximo valor que puede medir el instrumento (valor de fondo de escala) o con respecto a la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo medibles.

Así pues,

$$\text{Error absoluto} = \text{resultado} - \text{valor verdadero}$$

Sin embargo, lo más común es especificar el error como cociente entre el error absoluto y el verdadero valor de la magnitud medida, cociente que se denomina error relativo. Este suele tener dos términos: uno dado como porcentaje (tanto por ciento) de la lectura, y otro constante, que puede estar especificado como porcentaje del fondo de escala o un umbral, o un número de «cuentas» en el caso de instrumentos digitales.

$$\text{Error relativo} = \text{error absoluto} / \text{valor verdadero}$$

Para algunos sensores puede que se especifique un error relativo como porcentaje del fondo de escala, sin más, o bien como porcentaje de la lectura exclusivamente. Si el margen de medida incluye valores pequeños, lo primero implica que en dicha zona del margen se tendrá un error muy grande, mientras que lo segundo da lugar a errores increíblemente pequeños.

Para poder comparar distintos sensores entre sí en cuanto a su exactitud, se introduce la denominada «clase de precisión». Todos los sensores de una misma clase tienen un error en la medida, dentro de su alcance nominal y en unas condiciones establecidas, que no supera un valor concreto, denominado «índice de clase».

Este es el error de medida porcentual, referido a un valor convencional que es la amplitud del margen de medida o el valor superior de dicho alcance. Así, un sensor de posición de clase 0,2 y un alcance de 10 mm, en las condiciones ambientales de referencia, tiene un error inferior a 20  $\mu\text{m}$  al medir cualquier posición dentro de dicho alcance.

El valor medido y su inexactitud deben darse con valores numéricos compatibles, de forma que el resultado numérico de la medida no debe tener más cifras de las que se puedan considerar válidas a la luz de la incertidumbre sobre dicho resultado. Por ejemplo, al medir la temperatura ambiente, un resultado de la forma  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  está expresado correctamente, mientras que las expresiones  $20^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ,  $20,5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y  $20,5^{\circ}\text{C} \pm 10\%$  son todas incorrectas.

Hay que ser también precavido al traducir unidades, para no aumentar falsamente la precisión. Por ejemplo, una longitud de 19,0 pulgadas (1 pulgada = 25,4 mm) no puede expresarse directamente como 482,6 mm, porque mientras el resultado original da a entender que hay una indeterminación en la cifra de las décimas de pulgada (2,54 mm), el segundo coloca la indeterminación en la cifra de las décimas de milímetro. Es decir, el resultado original da a entender que la longitud real está entre 485 mm y 480 mm, mientras que la traducción directa sugiere que está entre 482,5 y 482,7 mm.

La fidelidad (en inglés americano designada a veces como «precisión») es la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de medida de dar el mismo valor de la magnitud medida, al medir varias veces en unas mismas condiciones determinadas (ambientales, operador, etc.) prescindiendo de su concordancia o discrepancia con el valor real de dicha magnitud. La fidelidad implica que se tenga simultáneamente una conformidad en las sucesivas lecturas y un número alto de cifras significativas y es, por tanto, una condición necesaria pero no suficiente para la exactitud.

La repetibilidad se refiere al mismo hecho, pero cuando las medidas se realizan en un intervalo de tiempo corto. Cuantitativamente, es el valor por debajo del cual se encuentra, una probabilidad especificada, el valor absoluto de la diferencia entre dos resultados individuales obtenidos en las condiciones antedichas. Si no se dice lo contrario, la probabilidad se toma del 95%.

La reproducibilidad se refiere también al grado de coincidencia entre distintas lecturas individuales cuando se determina el mismo parámetro con un método concreto, pero con un conjunto de medidas a largo plazo o realizadas por personas distintas o con distintos aparatos o en diferentes laboratorios. Cuantitativamente, es el valor por debajo del que se encuentra, con una probabilidad especificada, el valor absoluto de la diferencia entre dos resultados individuales obtenidos en las condiciones anteriores. Si no se dice lo contrario, la probabilidad se toma del 95%.

En sensores, cuando hay una variación de la salida a lo largo del tiempo se habla a veces de «inestabilidad», y se dice que el sensor tiene derivas. En particular, se especifican a veces las denominadas derivas de cero y derivas del factor de escala. La deriva de cero expresa la relación de la salida con entrada nula. La deriva del factor de escala expresa la variación de la sensibilidad.

La sensibilidad o factor de escala es la pendiente de la curva de calibración, que puede ser o no constante a lo largo de la escala de medida. Para un sensor cuya salida esté relacionada con la entrada "x" mediante la ecuación  $y = f(x)$ , la sensibilidad en el punto  $x_a$ ,  $S(x_a)$ , es

$$S(x_a) = dy/dx \big|_{x=x_a} \quad (1)$$

En los sensores interesa tener una sensibilidad alta y, si es posible, constante.

Para un sensor con respuesta

$$y = kx + b \quad (2)$$

La sensibilidad es  $S = k$ , para todo el margen de valores de x aplicables. Para uno cuya respuesta sea

$$y = kx^2 + b \quad (3)$$

**2.4.2 Linealidad, resolución.** Las tres características anteriores –Exactitud, fidelidad y sensibilidad– son suficientes para describir el comportamiento estático de un sensor. Pero a veces se emplean, además o en su lugar, otras que expresan características alternativas o de interés particular para ciertos casos, o bien son complementarias de cara a conocer lo idóneo de un sistema de medida para una aplicación dada.

La **linealidad** expresa el grado de coincidencia entre la curva de calibración y una línea recta determinada. Según cual sea dicha línea se habla de:

**Linealidad independiente:** la línea de referencia se define por el método de mínimos cuadrados. De esta forma, el máximo error positivo y el mínimo error negativo son iguales. Es la forma de especificación que suele dar «mejor» calidad.

**Linealidad ajustada al cero:** la recta se define también por el método de los mínimos cuadrados, pero con la restricción adicional de pasar por el cero.

**Linealidad terminal:** la recta se define por la salida sin entrada (o la menor del margen de medida) y la salida teórica máxima, correspondiente a la mayor entrada admitida.

**Linealidad a través de los extremos:** la recta se define mediante la salida real cuando la entrada es la menor del alcance especificado, y la salida real cuando la entrada es la máxima del alcance especificado.

**Linealidad teórica:** la recta es la definida por las previsiones teóricas formuladas al diseñar el sensor.

Resulta, pues, que la linealidad expresa hasta qué punto es constante la sensibilidad del sensor, pero para que un sensor sea válido no es condición indispensable que sea lineal.

El interés de la linealidad está en que la conversión lectura-valor medido es más fácil si la sensibilidad es constante, pues entonces basta multiplicar la indicación de salida por un factor constante para conocer el valor de la entrada. Además, en instrumentos lineales la no linealidad equivale a la inexactitud. Actualmente, con la posibilidad de incorporar un microprocesador en los sistemas de medida, interesa más la repetibilidad que la linealidad, pues siempre es posible crear una tabla conteniendo los valores de entrada que correspondan a los valores de salida detectados. Mediante una interpolación adecuada, es posible reducir el tamaño de dicha tabla.

Los principales factores que influyen en la linealidad son: la **resolución**, el umbral y la histéresis. La resolución o discriminación es el incremento mínimo de la entrada para el que se obtiene un cambio de salida. Cuando el incremento de la entrada se produce a partir de cero, se habla de umbral.

La histéresis se refiere a la diferencia en la salida para una misma entrada, según la dirección en que se alcance. Es decir, puede suceder, análogamente a la magnetización de los materiales ferromagnéticos, que la salida correspondiente a una entrada dependa de si la entrada previa fue mayor o menor que la entrada actual.

### **2.4.3 Errores Sistemáticos.**

La calibración estática de un sensor permite detectar y corregir los denominados errores sistemáticos. Se dice de un error que es sistemático cuando en el curso de varias medidas de una magnitud de un determinado valor, hechas en las mismas condiciones, o bien permanece en valor absoluto y signo, o bien varía de acuerdo con una ley definida cuando cambian las condiciones de medida. Dado que el tiempo es también una condición de medida, éstas deben ser realizadas en un intervalo de tiempo breve.

Los errores sistemáticos dan lugar, pues, a un sesgo (en inglés, «bias») en las medidas. La posibilidad de estos errores se entiende si se considera que en el resultado de una medida influye no sólo el aparato empleado para efectuarla sino también el método, el operario (en algunos casos) y toda una serie de circunstancias (climáticas, mecánicas, eléctricas, etc.) que nunca son ideales, constantes y conocidas todas.

La presencia de errores sistemáticos puede descubrirse, por tanto, midiendo la misma magnitud con dos aparatos distintos, o con dos métodos distintos, o dando las lecturas dos operarios distintos, o cambiando de forma ordenada las condiciones de medida y viendo su efecto en los resultados. Para juzgar sobre la consistencia de los resultados obtenidos hay que recurrir a criterios estadísticos.

En cualquier caso, siempre hay un cierto riesgo de que un error sistemático pase desapercibido, incluso en las medidas de mayor calidad. El objetivo será, pues, tener un riesgo muy pequeño de haya errores grandes no detectados.

### **2.4.4 Errores Aleatorios.**

Los errores son los que permanecen una vez eliminadas las causas de errores sistemáticos. Se manifiestan cuando se mide repetidamente la misma magnitud, con el mismo instrumento y el mismo método, y presentan las siguientes propiedades:

1. Los errores aleatorios positivos y negativos de igual valor absoluto tienen la misma probabilidad de producirse.
2. Los errores aleatorios son tanto menos probables cuanto mayor sea su valor.

3. Al aumentar el número de medidas, la medida aritmética de los errores aleatorios de una muestra –conjunto de medidas– tiende a cero.
4. Para un método de medida determinado, los errores aleatorios no exceden de cierto valor. Las medidas que lo superan deben repetirse y, en su caso, estudiarse por separado.

Los errores aleatorios se denominan también errores accidentales o fortuitos, y ello da a entender que pueden ser inevitables. La ausencia de variaciones de unas a otras lecturas cuando se están realizando una serie de medidas de la misma magnitud con el mismo sistema de medida, no es necesariamente una indicación de ausencia de errores aleatorios. Puede suceder, por ejemplo, que el instrumento no tenga suficiente resolución, es decir, que su capacidad para apreciar pequeños cambios en la magnitud medida sea muy limitada, de modo que no sean detectados por el operario en el dispositivo final de lectura.

La presencia de errores aleatorios hace que después de realizar una o varias medidas de una determinada magnitud se tenga una incertidumbre sobre el verdadero valor de está (valor «exacto»).

Cuanto mayor sea dicha incertidumbre, evaluada mediante parámetros estadísticos, menos repetible es la medida. Si además hay errores sistemáticos, el resultado diferirá del correcto y, por tanto, la medida será inexacta.

Si se hace la media de varias lecturas, los errores aleatorios se cancelan y quedan sólo los errores sistemáticos. Ya que éstos son reproducibles, se pueden conocer para unas condiciones de medida dadas y corregir la lectura cuando se mida en las mismas condiciones.

Esta determinación de la diferencia entre el verdadero valor y el valor obtenido se realiza durante la calibración, en unas condiciones dadas, y normalmente durante este proceso se ajusta el instrumento para eliminar dicho error. Cuando se realice una medida aislada, en las mismas condiciones, quedará sólo la componente aleatoria del error.

Sucede en la práctica, sin embargo, que durante el proceso de calibración sólo se pueden eliminar los errores sistemáticos en condiciones muy específicas, por lo que es posible que en otras condiciones se tengan errores de este tipo incluso superiores a los aleatorios que el fabricante recoge en las especificaciones.

Aunque no hay obligatoriedad de hacerlo así, lo habitual es especificar el margen que es probable contenga el verdadero valor, dando de alguna forma la diferencia entre el valor máximo y el mínimo.

## **2.5 Características dinámicas de los sistemas de medida.**

La presencia de inercias (masas, inductancias,...), capacidades (eléctricas, térmicas, fluidas, etc.), y, en general, de elementos que almacenan energía, hace que la respuesta de un sensor a señales de entrada variables sea distinta a la que presenta cuando las señales de entrada son constantes, descrita mediante las características estáticas.

La descripción del comportamiento del sensor se hace en este caso mediante las denominadas características dinámicas: error dinámico y velocidad de respuesta (retardo). El error dinámico es la diferencia entre el valor indicado y el valor exacto de la variable medida, siendo nulo el error estático. Describe la diferencia en la respuesta del sensor a una magnitud de entrada según que ésta sea constante o variable en el tiempo.

La velocidad de respuesta indica la rapidez con que el sistema de medida responde a los cambios en la variable de entrada. En cuanto a la medida, no importa mucho que exista un retardo entre la magnitud aplicada a la entrada y la indicación correspondiente a la salida. Pero si el sensor forma parte de un sistema de control, este retardo puede dar lugar a oscilaciones.

Para poder determinar las características dinámicas de un sensor, hay que aplicar a su entrada una magnitud variable. Ésta puede ser de muchas formas distintas, pero lo normal y suficiente para un sistema lineal (i.e., cuando se cumple el principio de la superposición) es estudiar la respuesta frente a una entrada transitoria (impulso, escalón, rampa), periódica (senoidal) o aleatoria (ruido blanco). La elección de una u otra depende del tipo de sensor. Es difícil, por ejemplo, tener una temperatura con variaciones senoidales, pero es fácil producir un cambio de temperatura brusco, a modo de escalón. En cambio, es más fácil producir un impulso que un escalón de aceleración.

Para describir matemáticamente el comportamiento dinámico del sensor, se supone que la salida y la entrada se relacionan según una ecuación diferencial lineal de coeficientes constantes y que, por lo tanto, se tiene un sistema lineal invariante en el tiempo. En estas condiciones, la relación entre la salida y la entrada del sensor puede expresarse de manera simple, en forma de cociente, empleando la transformada de Laplace de ambas señales y la función de transferencia propia del sensor. Hay que recordar, no obstante, que esta última da una relación general entre la salida y la entrada, pero no entre sus valores instantáneos.

Las características dinámicas de los sensores pueden estudiarse entonces para cada señal de entrada aplicada, agrupándolos de acuerdo con el orden de la función de transferencia que los describe. Normalmente no es necesario emplear modelos de orden superior a dos.

### 2.5.1 Sistemas de medida de orden cero.

Un sensor de orden cero es aquel cuya salida está relacionada con la entrada mediante una ecuación del tipo:

$$Y(t) = k x(t) \quad (4)$$

de forma que su comportamiento queda caracterizado por su sensibilidad estática,  $k$ , y se mantiene constante con independencia de la frecuencia de variación de la entrada. En consecuencia, tanto su error dinámico como su retardo son nulos.

Para que la relación entrada-salida sea de la forma indicada por la ecuación anterior, es necesario que el sensor no incluya ningún elemento almacenador de energía. Es el caso de los potenciómetros empleados para la medida de desplazamientos lineales y angulares. De acuerdo con la siguiente figura se tiene:

$$y = E \frac{x}{x_M} \quad (5)$$

donde  $0 \leq x \leq x_M$ . En este caso,  $k = E/x_M$

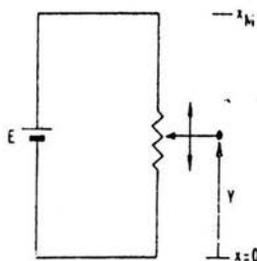


Figura 2.2. Ejemplo de la aplicación de un potenciómetro empleado para la medida de desplazamientos lineales y angulares

Ahora bien, en términos estrictos un modelo como el indicado es siempre una abstracción matemática, pues es inevitable la presencia de «imperfecciones» que impiden la aplicación del modelo en todas las circunstancias posibles. En el caso del potenciómetro se puede apuntar, por ejemplo, que su empleo en la medida de movimientos rápidos es inviable.

### 2.5.2 Sistemas de medida de primer orden.

En un sensor de primer orden hay un elemento que almacena energía y otro que la disipa. La relación entre la entrada  $x(t)$  y la salida  $y(t)$  viene dada por una ecuación diferencial del tipo:

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = x(t) \quad (6)$$

La función de transferencia correspondiente es:

$$\frac{Y(s)}{K(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (7)$$

donde  $k = 1 / a_0$  es la denominada sensibilidad estática, y  $\tau = a_1 / a_0$  se conoce como constante de tiempo del sistema.

La frecuencia propia,  $\omega_c$ , viene dada por  $1 / \tau$ . El sistema queda caracterizado, pues, por dos parámetros:  $k$  para la respuesta estática y  $\omega_c$  o  $\tau$  para la respuesta dinámica.

ENTRADA	SALIDA
Escalón, $u(t)$	$k(1 - e^{-t/\tau})$
Rampa, $Rt$	$Rkt - Rk\tau u(t) + Rk\tau e^{-t/\tau}$
Senoide, $A_s$	$\frac{kA_s \tau \omega e^{-t/\tau}}{1 + \tau^2 \omega^2} + \frac{kA_s}{(1 + \tau^2 \omega^2)^{1/2}} \text{sen}(\omega t + \theta)$ <p style="text-align: center;"><math>\theta = \text{arc tan}(-\tau \omega)</math></p>

Tabla 2.3. Tabla de las expresiones de señal de salida para cada una de las entradas más frecuentes (escalón, rampa y senoide).

Para la entrada senoidal se ha incluido el término transitorio de la respuesta: la medida se suele realizar al cabo de un tiempo después de aplicada la entrada, tal que el término transitorio se haya extinguido.

El error dinámico y el retardo de un sensor de primer orden dependen de la forma de la señal de entrada.

ENTRADA	ERROR DINÁMICO	RETARDO
Escalón, U(t)	0	$\tau$
Rampa, Rt	$R[t + k(\tau-t)]$ o $Rt$	$\tau$
Senoide, A,	$1-(1+\tau^2)^{-1/2}$	$(\text{arc tan } \tau / )$

Tabla 2.4. Tabla de resumen de error dinámico y retardo para un sistema de primer orden.

Los dos valores del error dinámico en el caso de una entrada en rampa corresponden, respectivamente, a dos definiciones distintas:

$$ed = y(t) - x(t) \quad (8)$$

$$ed = y(t) - kx(t) \quad (9)$$

Para los casos de una entrada en escalón y una senoidal se ha empleado sólo esta segunda definición.

El hecho de que el error dinámico venga dado por expresiones bien definidas puede sugerir que es fácil corregirlo. Pero, en la práctica, difícilmente se estará midiendo una entrada con una variación tan simple como la definida por las expresiones anteriores.

Un ejemplo clásico de sensor de primer orden es un termómetro basado en un elemento de masa M, calor específico Cp (J/KgK), área de transmisión de calor A, y coeficiente de transmisión de calor, por convección, h (W/rr^AK). En régimen estacionario se cumplirá:

Calor entrada sensor - calor salida sensor = calor acumulado

Si se supone que del sensor no sale calor (por ejemplo a través de los hilos de conexión) y que su masa permanece constante (dilatación despreciable), si la temperatura (externa) a la que se somete el sensor es  $T_e$  y denominamos  $T_i$  a la temperatura interna, queda

$$hA(T_e - T_i)dt = MC_p dT_i \quad (10)$$

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{hA}{MC_p} (T_e - T_i) \quad (11)$$

Si llamamos  $\tau = MC_p/hA$ , queda finalmente

$$\frac{T_i(s)}{T_e(s)} = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (12)$$

Resulta, pues, que la resistencia a la transmisión del calor,  $1/hA$ , y la capacidad calorífica,  $MC_p$ , determinan el valor de la constante de tiempo y el retardo de la respuesta. Sin embargo el proceso de transducción en sí, es instantáneo pues una vez que se ha calentado el sensor éste da su señal de salida.

Ejemplo: Se determina la constante de tiempo aproximada de un termómetro introduciéndolo en un recipiente y anotando el tiempo que tarda en alcanzar el 63% de la lectura final. Si al hacer esta medida se obtiene un tiempo de 28 segundos, ¿qué retardo tendrá dicho termómetro al medir la temperatura de un baño que cambia cíclicamente a razón de dos veces cada minuto?

De la respuesta a un escalón se deduce  $\tau = 28$  s El retardo en la medida de una variación cíclica será

$$Tr = (\arctan \omega \tau) / \omega \quad (13)$$

La temperatura a medir tiene una frecuencia angular

$$\omega = 2\pi \frac{2}{60} = \frac{\pi}{15} = 0.209 \text{ rad / seg} \quad (14)$$

El retardo será

$$Tr = (\arctan 0,209 \times 28) / 0,209 = 6,7\text{s}$$

### 2.5.3 Sistemas de medida de segundo orden.

Un sensor es de segundo orden cuando incluye dos elementos que almacenan energía y otros dos que la disipan. La relación entre la entrada  $x(t)$  y la salida  $y(t)$  viene dada por una ecuación diferencial lineal de segundo orden de la forma:

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = x(t) \quad (15)$$

La función de transferencia correspondiente es

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (16)$$

donde  $k$  es la sensibilidad estática,  $\zeta$  es el coeficiente de amortiguamiento y  $\omega_n$  es la frecuencia natural del sensor. Hacen falta, pues, dos parámetros para definir su comportamiento dinámico y uno para su comportamiento estático.

Las expresiones genéricas de los parámetros de un sistema de segundo orden son

$$k = l/a_0 \quad (17)$$

$$\omega_n^2 = \frac{a_0}{a_2} \quad (18)$$

$$\zeta = \frac{a_1}{2(a_0 a_2)^{1/2}} \quad (19)$$

Puede observarse que estos tres parámetros son interdependientes y que la modificación de uno de ellos puede afectar a los otros dos. Solo  $a_0$ ,  $a_1$ , y  $a_2$  son independientes entre sí.

### 2.6 Características de entrada: impedancia.

La descripción de los sensores mediante sus características estáticas y sus características dinámicas no es, en modo alguno, completa. Para ilustrar esta afirmación considérense, por ejemplo, las situaciones siguientes.

En el caso de un potenciómetro, para evitar que el cursor pierda el contacto con el elemento resistivo es necesario que ejerza una fuerza sobre éste, ¿Qué sucede entonces si se pretende medir el movimiento de un elemento que sea incapaz de vencer el rozamiento entre el cursor y la pista?

Si para medir la temperatura que alcanza un transistor se emplea un termómetro con una masa importante respecto a la del transistor, al ponerlo en contacto con éste. ¿No lo enfriará dando, en consecuencia, una lectura inferior a la temperatura que tenía inicialmente el transistor?

Resulta que ni las características estáticas ni las dinámicas de los sensores, tal como se han expuesto, permiten describir el comportamiento real del conjunto sensor-sistema donde se mide. Ello es debido a que la descripción de un sensor o sistema de medida mediante esquemas de bloques, deja al margen el hecho de que en todo proceso de medida es inevitable la extracción de una cierta cantidad de energía del sistema donde se mide.

Cuando, debido a esta circunstancia, la variable medida queda alterada, se dice que hay un error por carga. Los esquemas de bloques sólo son válidos cuando no hay interacción energética entre bloques. El concepto de impedancia de entrada permite valorar si se producirá o no un error por carga.

En el proceso de medida de una variable cualquiera  $x_1$  siempre interviene además otra variable  $X_2$  tal que el producto  $x_1 X_2$  tiene dimensiones de potencia. Así, al medir una fuerza siempre se tiene una velocidad, al medir un caudal hay una caída de presión, al medir una temperatura hay un flujo de calor, al medir una corriente eléctrica se produce una caída de tensión, etc.

Por otra parte, las variables a medir que no sean mecánicas se designan como variables esfuerzo si se miden entre dos puntos o dos regiones del espacio, y como variables flujo si se miden en un punto o región del espacio. En el caso de variables mecánicas se designan como variables esfuerzo las que se miden en un punto, mientras que las variables flujo se miden entre dos puntos. Son, por ejemplo, variables esfuerzo la tensión eléctrica, la presión, la temperatura, la fuerza y el par mecánicos; mientras que son variables flujo la corriente eléctrica, el caudal volumétrico, la velocidad lineal y la velocidad angular.

Para el caso de un elemento que se pueda describir mediante relaciones lineales, la impedancia de entrada,  $Z(s)$ , se define como el cociente entre las transformadas de Laplace de una variable esfuerzo y de la variable flujo asociada. La admitancia de entrada,  $Y(s)$ , se define como el recíproco de  $Z(s)$ . El valor de ambas varía normalmente con la frecuencia. A frecuencias muy bajas, se habla, respectivamente, de rigidez y compliancia, en vez de impedancia y admitancia.

Resulta entonces que para tener un error por carga mínimo, al medir una variable esfuerzo es necesario que la impedancia de entrada sea alta. Si  $x_1$  es una variable esfuerzo,

$$Z(s) = x_1(s)x_2(s) \quad (20)$$

La potencia extraída del sistema será

$$P = x_1 x_2 \quad (21)$$

y si se desea que esta potencia sea mínima, debe serio  $X_2$  y de ahí resulta que la impedancia de entrada debe ser grande.

Al medir una variable flujo, para mantener  $P$  mínima es necesario que  $x_i$  sea pequeña, y ello exige una impedancia de entrada pequeña, es decir, una admitancia de entrada grande.

Pero para tener impedancias de entrada altas, puede ser necesario cambiar el valor numérico de los componentes del sistema o cambiar el diseño y usar un elemento activo. En este caso, la mayor parte de energía viene de una fuente externa y no necesariamente del medio donde se mide. Otra alternativa es medir empleando el método de cero, pues en éste sólo se extrae energía de formas importantes cuando hay un cambio en el valor de la entrada.

Finalmente puede haber otras perturbaciones imputables no a una "carga" sino al propio método de medida. Por ejemplo, si al medir la velocidad de un fluido se obstruye apreciablemente la sección del conducto, se obtendrá un resultado erróneo. Queda, pues, bien claro que no se puede aplicar un sensor directamente sin considerar el efecto de su presencia en el sistema del que se desea obtener información.

#### MAGNITUD A MEDIR

- Margen de medida
- Resolución
- Exactitud deseada
- Estabilidad
- Ancho de banda
- Tiempo de respuesta
- Límites absolutos posibles de la magnitud a medir
- Magnitudes interferentes

#### CARACTERÍSTICAS DE SALIDA

- Sensibilidad
- Tipo: tensión, corriente, frecuencia
- Impedancia
- Destino: Presentación analógica  
conversión digital
- Telemedida: ¿tipo?

#### CARACTERÍSTICAS DE ALIMENTACIÓN

- Tensión
- Corriente
- Potencia disponible
- Frecuencia (alterna)
- Estabilidad

#### CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES

- Margen de temperaturas
- Humedad
- Vibraciones
- Agentes químicos
- Atmósfera explosiva
- Entorno electromagnético

#### OTROS FACTORES

- Peso
- Dimensiones
- Vida media
- Costo de adquisición
- Disponibilidad
- Tiempo de instalación
- Longitud de cable necesaria
- Tipo de conector
- Situación en caso de fallo
- Costo de verificación
- Costo de mantenimiento
- Costo de sustitución

Tabla 2.5. Características principales que se deben tener en cuenta para elegir un sensor.

## 2.7 SENSORES PRIMARIOS.

Los sensores primarios son los dispositivos que permiten obtener una señal transducible a partir de la magnitud física a medir. Desde el punto de vista de los dominios de información, pueden contemplarse como elementos cuya entrada y salida pertenecen ambas al dominio "físico", mientras que los sensores electrónicos operan sobre su salida para hacer el paso al dominio eléctrico.

La clasificación que se utiliza a continuación se basa en la magnitud de entrada que detecta cada sensor.

## 2.8 SENSORES DE PRESIÓN.

El **tubo de Bourdon** es el sensor de presión más común, desarrollado por el ingeniero francés Eugene Bourdon, consiste básicamente en un tramo de tubo en forma de herradura, con un extremo sellado y el otro conectado a la fuente de presión.

Al ser la sección transversal del tubo elíptica o plana, al aplicarle una presión el tubo tiende a enderezarse, y al quitarla el tubo retorna a su forma original, siempre y cuando no se rebase el límite de elasticidad del material del tubo.

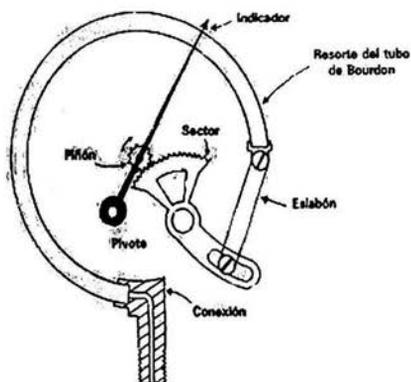


Figura 2.3. Esquema de un sensor de tipo tubo de Bourdon sencillo.....

La cantidad de enderezamiento que sufre el tubo es proporcional a la presión que se aplica, y como el extremo abierto del tubo esta fijo, entonces el extremo cerrado se puede conectar a un indicador, para señalar la presión; o a un transmisor para generar una señal neumática o eléctrica.

El rango de presión que se puede medir con el tubo de Bourdon depende del espesor de las paredes y del material con que se fabrica el tubo.

Posteriormente se desarrollo una versión extendida d el tubo de Bourdon en forma de **helicoid**e para dar más movimiento al extremo sellado; este elemento se denomina hélice. Con el se pueden manejar rangos de presión de aproximadamente 10:1, con una exactitud de  $\pm 1\%$  de la escala calibrada.

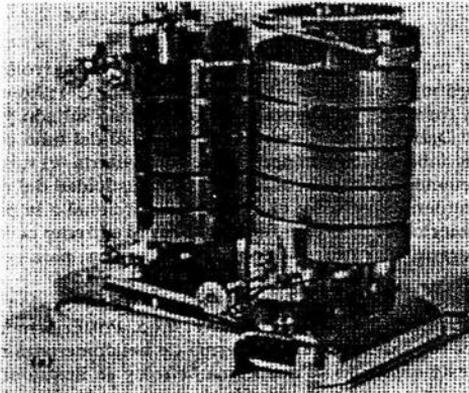


Figura 2.4. Imagen de un tubo de Bourdon helicoidal.....

Otro tipo común de tubo de Bourdon es el elemento **espiral** como el que se encuentra en las siguientes figuras:

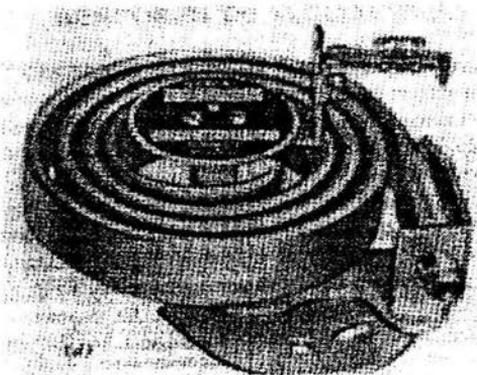


Figura 2.5. Imagen de un tubo de Bourdon de tipo espiral.....

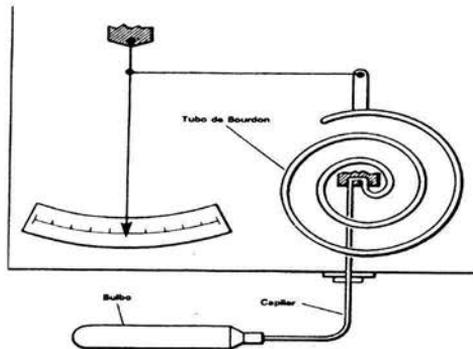


Figura 2.6. Esquema del tubo de Bourdon de espiral.

Otro tipo de sensor de presión es el de **fuelle**, el cual semeja una cápsula corrugada hecha de algún material elástico, por ejemplo, acero inoxidable o latón; al aumentar la presión, el fuelle se expande (o se contrae), y cuando disminuye, se contrae (o se expande). La cantidad de expansión o contracción dependerá de la presión que se aplica.

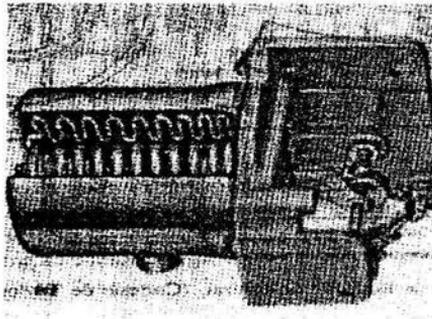


Figura 2.7. Imagen de un tubo de Bourdon de fuelle.

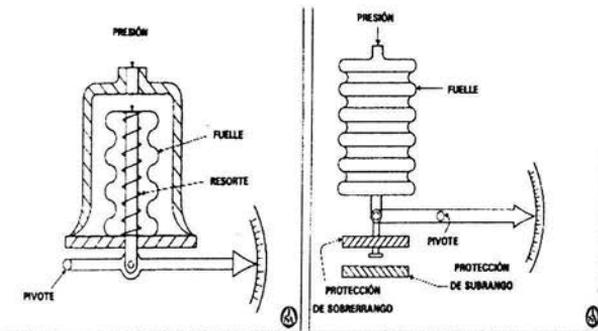


Figura 2.8. Esquema de un tubo de Bourdon de fuelle.

Un sensor semejante al de fuelle es el de **diafragma**; cuando se incrementa la presión en el proceso, el centro del diafragma se comprime; la cantidad de movimiento es proporcional a la presión que se aplica.

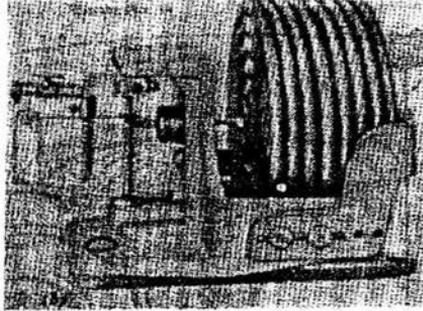


Figura 2.9. Imagen de un tubo de Bourdon de diafragma.

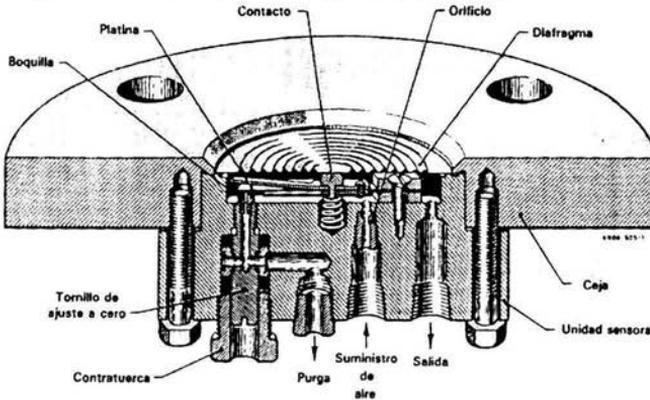


Figura 2.10. Esquema de las partes de un tubo de Bourdon de diafragma.

## 2.9 SENSORES DE FLUJO.

El flujo es una de las dos variables de proceso que se miden más frecuentemente, la otra es la temperatura; en consecuencia, se han desarrollado muchos tipos de sensores de flujo.

Probablemente el sensor de flujo más popular es el **medidor de orificio**, que es un disco plano con un agujero. El disco es insertado en la línea de proceso, perpendicular al movimiento del fluido, con objeto de producir una caída de presión,  $\Delta P$ , la cual es proporcional a la razón de flujo volumétrico a través del orificio.

Generalmente, la caída de presión a través del orificio se mide con:

- **Espitas laterales**, las cuales son las más comunes. La técnica consiste en medir la caída de presión en las cejas con que se sostiene al orificio en la línea de proceso.
- **Espitas de vena contracta**, que indican la caída de presión más grande.
- **Otros tipos en los que se incluyen espitas radiales, angulares y de línea**; estos no son tan populares como los dos anteriores.

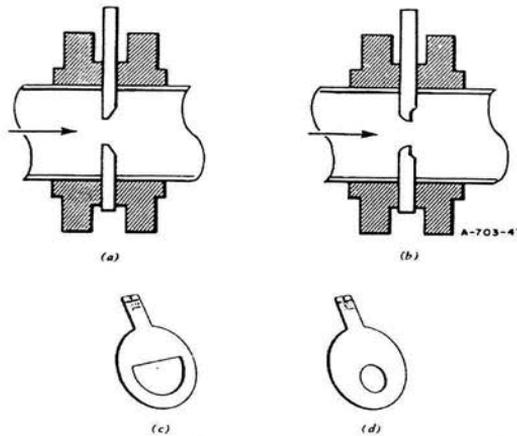


Figura 2.11. Imágenes de los medidores de orificio: a) De filo agudo, b) Filo de cuadrante, c) Filo de segmento, y d) Filo excéntrico.

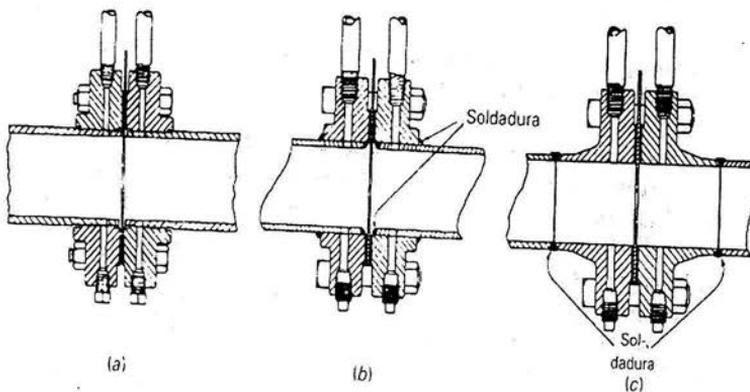
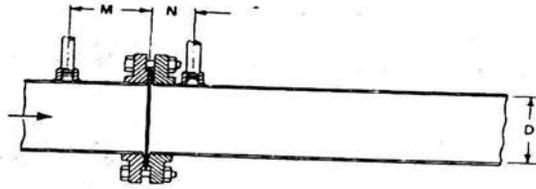


Figura 2.12. Imágenes de medidores de orificio de espitas laterales: a) Con unión de rosca, b) Con unión deslizable, c) Con unión soldada.

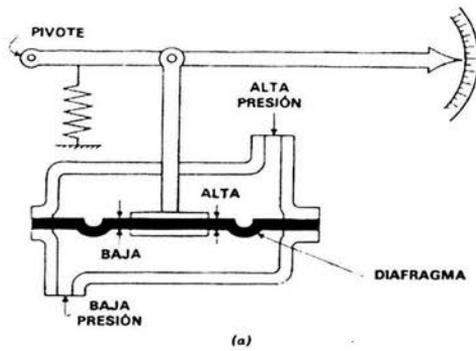


Dimensión M: se toma entre  $\frac{1}{4}$  y 2 diámetros de la tubería de corriente ascendente, frente a la placa de orificio.

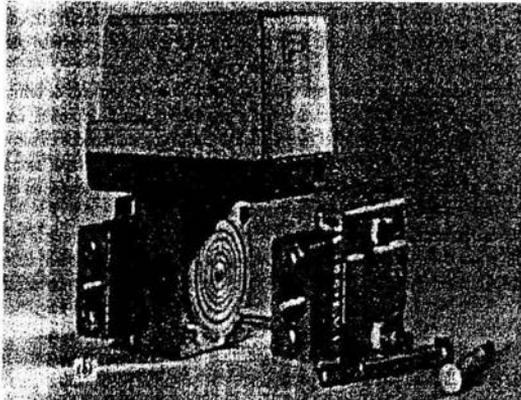
Razón entre el diámetro del orificio y el de la tubería	Ubicación de la espita de presión corriente abajo (N) (Diámetros de la tubería)		
	Mínimo	Medio	Máximo
0.2	0.37	0.85	1.30
0.3	0.44	0.80	1.15
0.4	0.47	0.73	1.00
0.5	0.47	0.66	0.84
0.6	0.42	0.57	0.70
0.7	0.35	0.45	0.55
0.8	0.25	0.33	0.41

Figura 2.13. Ilustración de un medidor de flujo de espitas de vena contracta.

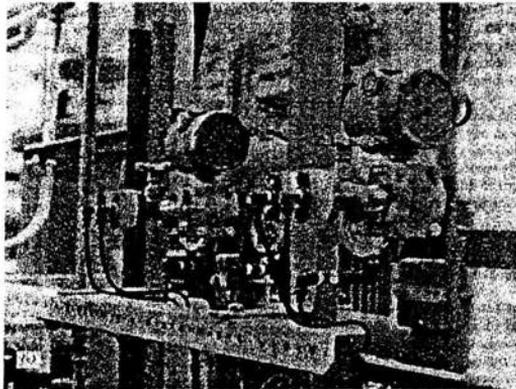
La que se coloca antes del orificio se conoce como espita de alta presión, y la que se coloca después del orificio se denomina espita de baja presión. En la mayor parte de las espitas el diámetro varía entre  $\frac{1}{4}$  y  $\frac{3}{4}$  de pulgada. La caída de presión que se mide es función de la ubicación de la espita y de la razón de flujo.



(a)



b)



c)

Figura 2.14. Imágenes de diferentes sensores y transmisores de diferencial de presión.

Se deben enfatizar varios puntos acerca de la utilización de los medidores de orificio para medir flujo; el primero es que la señal que sale de la combinación orificio/transmisor es la caída de presión a través del orificio no el flujo. Para medir la caída de presión a través del orificio se utiliza un sensor diferencial de presión. Además, el alcance en rango del medidor de orificio, la razón del flujo máximo y mínimo que se puede medir, es de casi 3:1. Es importante saber esto, ya que así se conoce la exactitud que se puede esperar cuando el proceso se ejecuta con cargas altas o bajas.

Existen varias causas posibles para evitar la utilización de los sensores de orificio, algunas de ellas es que no exista suficiente presión para crear una caída de presión, como en el caso del flujo por gravedad y el flujo de fluidos corrosivos, con sólidos en suspensión que puedan bloquear el orificio, o fluidos cercanos a la presión de vapor saturado que puedan sufrir un cambio rápido cuando se sujetan a una caída de presión, en estos casos se requiere otro tipo de sensor para medir el flujo.

Otro tipo común de sensor de flujo es el **medidor magnético**, cuyo principio de operación es la ley de Faraday; es decir, cuando un material conductor (un fluido) se mueve en ángulo recto a través de un campo magnético, se induce un voltaje, el cual es proporcional a la intensidad del campo magnético y a la velocidad del fluido. Si la intensidad del campo magnético es constante, entonces el voltaje únicamente es proporcional a la velocidad del fluido; además, la velocidad que se mide es la promedio y, por lo tanto, este sensor se puede utilizar para los dos regímenes: laminar y turbulento. Para la calibración de este medidor de flujo se debe tomar en cuenta el área de sección transversal del tubo, de manera que con la electrónica que se asocia al medidor sea posible calcular el flujo volumétrico.

Puesto que con él no se restringe el flujo, el medidor magnético de flujo es un dispositivo con caída de presión cero que se puede utilizar para medir flujo por gravedad, fluidos con variaciones rápidas y flujo de fluidos próximos a su presión de vapor. Sin embargo, en el fluido se debe tener un mínimo de conductividad de aproximadamente  $10 \mu\text{ohm}/\text{cm}^2$ ; por lo cual el medidor no es apropiado para medir ni gases ni hidrocarburos líquidos.

El ajuste en rango del medidor magnético de flujo es de 30:1 el cual es significativamente mayor que el de los medidores de orificio, pero su costo también es mayor. La diferencia en costo aumenta conforme se incrementa el tamaño de la tubería que se utiliza en el proceso.

Finalmente, otra consideración importante en la aplicación y mantenimiento de los medidores magnéticos de flujo es el recubrimiento de los electrodos, el cual representa otra resistencia eléctrica, de lo que resultan lecturas erróneas; los fabricantes ofrecen técnicas tales como los limitadores ultrasónicos para mantener los electrodos limpios.

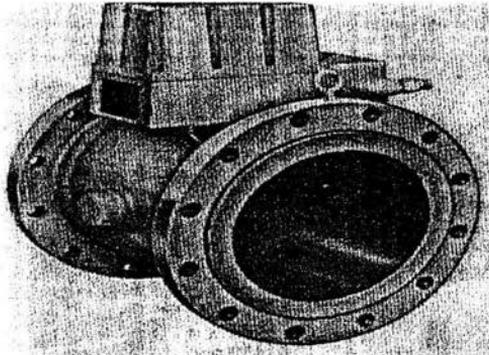


Figura 2.15. Imagen de un medidor magnético de flujo.

Otro medidor de flujo importante es el **medidor de turbina** que es uno de los más precisos de que se dispone comercialmente. Su principio de funcionamiento se basa en un rotor que se hace girar con el flujo del líquido; la rotación de las aspas se detecta mediante una bobina de colección magnética, la cual emite pulsos a una frecuencia que es proporcional a la razón de flujo volumétrico; este pulso se convierte en una señal equivalente de 4-20 mA, de manera que se pueda utilizar con instrumentación electrónica estándar, el convertidor o transductor es generalmente parte integral del medidor.

Uno de los problemas que más comúnmente se asocia con los medidores de turbina es el de los cojinetes (rodamientos), por lo que se requiere que los líquidos sean limpios y con algunas propiedades lubricantes.

Hasta aquí hemos estudiado los medidores de flujo que se utilizan más comúnmente en la industria de proceso, aunque existen muchos otros tipos, que van desde el rotómetro, toberas de flujo, tubos de venturi, tubos pitot y anubares, los cuales se han utilizado durante muchos años, hasta los desarrollados más recientemente, como son los medidores de vórtice, los ultrasónicos y los medidores de remolino.

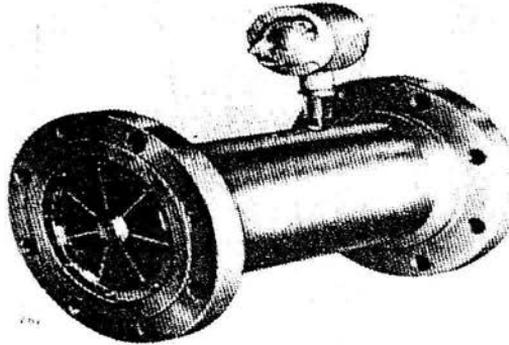
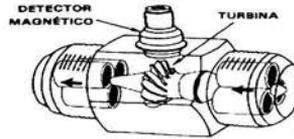


Figura 2.16. Ilustración de un medidor de flujo de turbina:

## 2.10 SENSORES DE NIVEL.

Los tres medidores de nivel más importantes son el de **diferencial de presión**, el de **flotador** y el de **burbujeo**.

El **método de diferencial de presión** consiste en detectar la diferencia de presión entre la presión en el fondo del líquido y en la parte superior del líquido, la cual es ocasionada por el peso que origina el nivel del líquido. El extremo con que se detecta la presión en el fondo del líquido se conoce como extremo de alta presión, y el que se utiliza para detectar la presión en la parte superior del líquido, como extremo de baja presión. Una vez que se conoce el diferencial de presión y la densidad del líquido, se puede obtener el nivel.

Con el **sensor de flotador** se detecta el cambio en la fuerza de empuje sobre un cuerpo sumergido en el líquido. Este sensor se instala generalmente en un ensamble que se monta de manera externa al recipiente. La fuerza que se requiere para mantener al flotador en su lugar es proporcional al nivel del líquido y se convierte en una señal en el transmisor.

Este tipo de sensor es un poco menos caro que los demás sensores de nivel; sin embargo, su mayor desventaja estriba en la incapacidad para cambiar el cero y la escala; para cambiar el cero se requiere la reubicación de la cápsula completa.

El **sensor de burbujeo** es otro tipo de sensor de presión hidrostática y consiste en un tubo con gas inerte que se sumerge en el líquido; el aire o gas inerte que fluye a través del tubo se regula para producir una corriente continua de burbujas, y la presión que se requiere para producir esta corriente continua es una medida de la presión hidrostática o nivel del líquido.

En las siguientes imágenes tenemos como se instalan los transmisores de diferencial de presión en recipientes abiertos y cerrados.

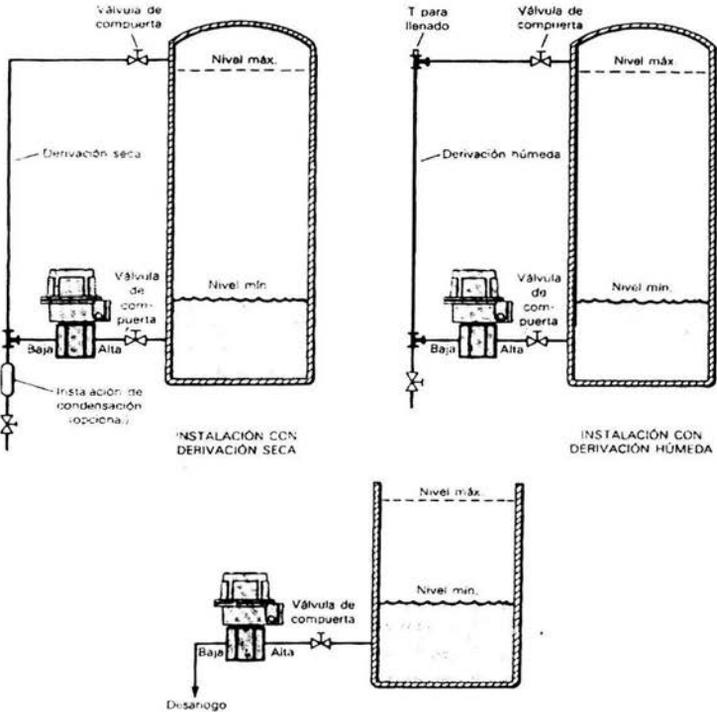


Figura 2.17. Imágenes de instalación de Transmisores de diferencial de presión en recipientes abiertos y cerrados.

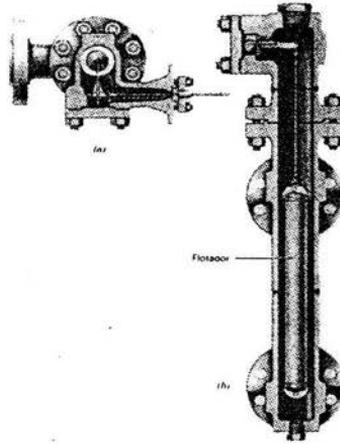


Figura 2.18. Imagen de un sensor de nivel con flotador.

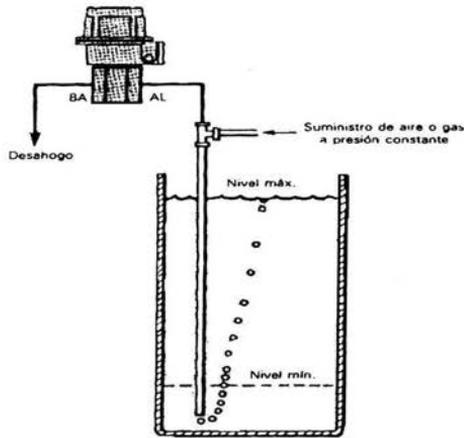


Figura 2.19. Figura de un sensor de nivel de burbujeo.

Existen otros métodos nuevos para medir el nivel en los tanques, algunos de éstos son patrones de capacitancia, sistemas ultrasónicos y sistemas de radiación nuclear; los dos últimos sensores también se utilizan para medir el nivel en materiales sólidos.

## 2.11 SENSORES DE TEMPERATURA.

La temperatura, junto con el flujo, es la variable que con mayor frecuencia se mide en la industria de proceso; una razón simple es que casi todos los fenómenos físicos se ven afectados por ésta. La temperatura se utiliza frecuentemente para inferir otras variables del proceso; dos ejemplos comunes son las columnas de destilación y los reactores químicos.

A causa de los múltiples efectos que se producen con la temperatura, se han desarrollado numerosos dispositivos para medirla; con muy pocas excepciones, los dispositivos caen en cuatro clasificaciones diferentes.

Termómetros de cuarzo, conos pirométricos y pinturas especializadas son algunos de los sensores de temperatura que no entran en la clasificación.

### **Métodos sin contacto.**

En primer lugar tenemos los métodos sin contacto donde el principio básico es como su nombre lo indica sin un contacto directo.

Los principales sensores de este tipo son: **Los pirómetros ópticos, pirómetros por radiación y Técnicas infrarrojas.** Este tipo de sensores no serán tratados en este trabajo por considerar que quedan fuera del alcance del mismo.

### ***Termómetros de expansión.***

**Los termómetros de líquido en vidrio** que indican el cambio de temperatura que causa diferencia entre el coeficiente de temperatura de expansión del vidrio y del líquido que se utiliza; los líquidos más utilizados son mercurio y alcohol.

Los termómetros de mercurio que se fabrican con vidrio ordinario son útiles entre -35°F y 600°F, el límite inferior se debe al punto de congelación del mercurio y el superior a su punto de ebullición. Si el espacio que queda arriba del mercurio se llena con un gas inerte, generalmente nitrógeno, para evitar la ebullición el rango útil se puede extender hasta los 950°F; tales termómetros llevan generalmente la inscripción de "llenado con nitrógeno" ("nitrogen filled). Para temperaturas por debajo del punto de congelación del mercurio (-38°F) se debe emplear otro líquido; para temperaturas debajo de -80°F se utiliza ampliamente el alcohol; para temperaturas hasta de -200°F se utiliza pentano, y tolueno para temperaturas debajo de -200°F.

**Los termómetros de tira bimetálica** que trabajan con base en el principio de que los metales se expanden con la temperatura y que los coeficientes de expansión no son los mismos para todos los metales.

El elemento sensible a la temperatura se compone de dos metales diferentes que se unen en una tira, el coeficiente de expansión de uno de los metales es alto, y el del otro es bajo; una combinación corriente es el invar. (64% Fe, 36% Ni), cuyo coeficiente es bajo, y la aleación de níquel-hierro, cuyo coeficiente es alto.

Generalmente la expansión con la temperatura es baja, y por esta razón la tira bimetalica se enrolla en forma de espiral; conforme la temperatura se incrementa, la espiral tiende a combarse hacia el lado del metal con bajo coeficiente térmico.

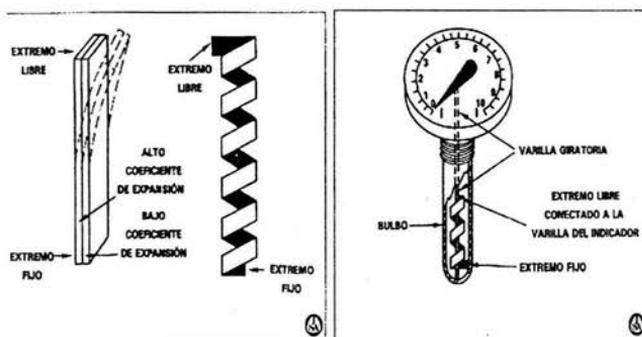


Figura 2.20. Ilustración de un termómetro típico de tira bimetalica.

El **termómetro de sistema lleno** donde el líquido del sistema se expande o se contrae con las variaciones de temperatura, lo cual se detecta mediante el resorte de Bourdon y se transmite a un indicador o transmisor. A causa de la simplicidad de su diseño, confiabilidad, bajo costo relativo y seguridad inherente, estos elementos son populares en la industria de proceso. La Scientific Apparatus Manufacturers' Association (SAMA) estableció cuatro clases principales de sistemas llenos con subclasificaciones. Las diferencias más significativas entre las clasificaciones son el líquido que se utiliza y la compensación de las diferencias de temperatura entre el bulbo, la capilaridad y el resorte de Bourdon.

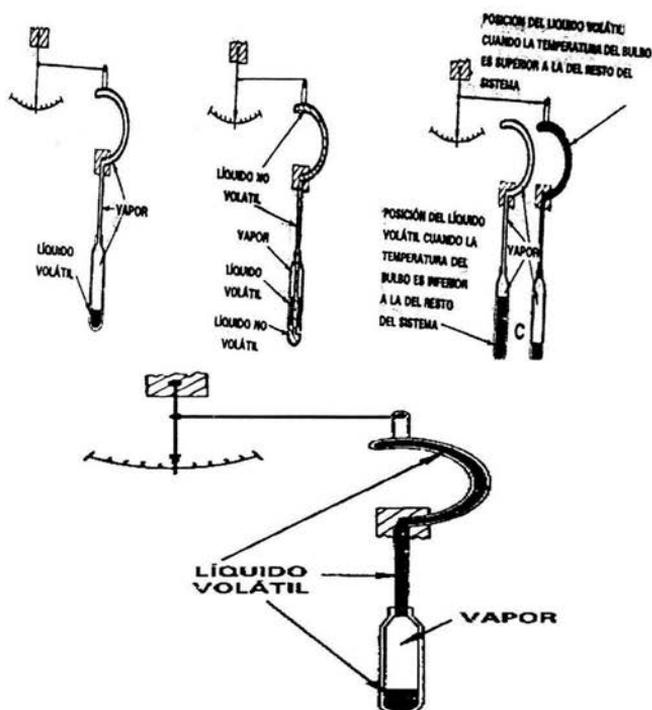


Figura 2.21. Ilustraciones de termómetros de sistema lleno.

## TERMÓMETROS DE DISPOSITIVOS RESISTIVOS (TDR).

**Termómetros de resistencia.** Estos elementos se basan en el principio de que la resistencia eléctrica de los metales puros se incrementa con la temperatura y, ya que la resistencia eléctrica se puede medir con bastante precisión, esto proporciona un medio para medir la temperatura con mucha exactitud. Los metales que se utilizan más comúnmente son platino, níquel, tungsteno y cobre. Para la lectura de la resistencia y, en consecuencia, también para la temperatura generalmente se utilizan puentes de Wheatstone.

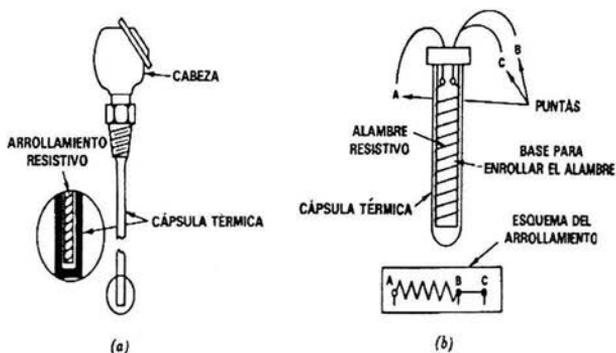


Figura 2.22. Esquema de los termómetros de resistencia. a) De ensamble, b) De componentes.

Otro tipo de sensores resistivos son los **termistores** que detectan cambios muy leves de temperatura. Los termistores se fabrican con la combinación sinterizada de material cerámico y alguna clase de óxido metálico semiconductor, como níquel, manganeso, cobre, titanio o hierro. En los termistores se tiene un coeficiente de resistividad térmica muy negativo, o algunas veces positivo.

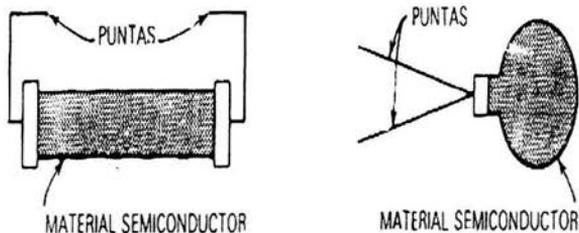


Figura 2.23. Imagen de un termistor típico.

## TERMOPARES.

Este elemento es el sensor de temperatura a nivel industrial más conocido. Su principio de funcionamiento lo descubrió T. J. Seebeck, en 1821; en el efecto de Seebeck, o principio de Seebeck, se establece que hay un flujo de corriente eléctrica en un circuito de dos metales diferentes si las dos uniones están a temperaturas diferentes. El tipo más común de termopares son platino-platino/rodio, cobre-constantan, hierro-constantan, cromel-alumel y cromel-constantan.

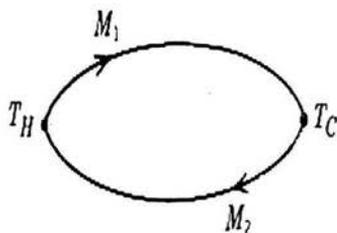


Figura 2.24. Esquema de un circuito de termopar sencillo:

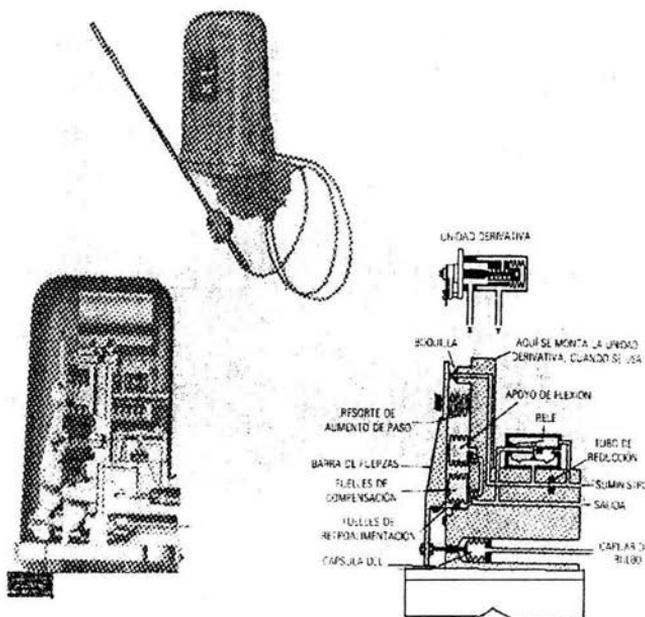


Figura 2.25. Imágenes del ensamblaje de los sistemas de termopar.....

Por último tenemos la imagen de un circuito para medición con termopar:

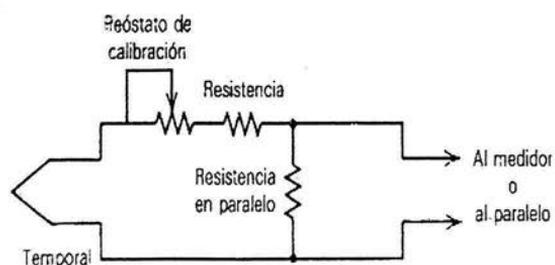


Figura 2.26. Circuito para la medición con un termopar.

### **CAPITULO 3**

**Ecuaciones que permiten el uso alternativo de sensores**

### "Ecuaciones que permiten el uso alternativo de sensores".

Ahora mencionaremos las ecuaciones fundamentales que rigen a cada uno de los sensores principales en la industria química ya que gracias a ellas es posible monitorear todas las variables del proceso en un momento dado.

**3.1 Sensores de temperatura: bimetales.** Se denomina bimetálico a toda pieza formada por dos metales con distinto coeficiente de dilatación térmica unidos firmemente, por ejemplo, mediante soldadura autógena, y sometidos a la misma temperatura. Cuando se produce un cambio de temperatura, la pieza se deforma según un arco circular uniforme. El radio de curvatura,  $r$ , al pasar de una temperatura  $T_1$  a otra  $T_2$  viene dado por:

$$r = \frac{e \left[ 3(1+m)^2 + (1+mn) \left( m^2 + \frac{1}{mn} \right) \right]}{6(\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1)(1+m)^2} \quad (22)$$

siendo:

$e$ : espesor total de la pieza.

$n$ : la relación entre módulos de elasticidad =  $E_B/E_A$

$m$ : la relación de espesores =  $e_B/e_A$

$\alpha_A, \alpha_B$ : los coeficientes de dilatación lineal

Si se emplean materiales con módulos de elasticidad y espesores similares ( $m \approx 1, n \approx 1$ , que es lo habitual, la expresión anterior se reduce a:

$$r = \frac{2e}{3(\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1)} \quad (23)$$

El radio de curvatura varía, pues, de forma inversamente proporcional a la diferencia de temperaturas, de modo que un sensor de posición o de desplazamiento permite la obtención de una señal eléctrica.

También puede calcularse la fuerza desarrollada por un elemento de este tipo que estuviera total o parcialmente empotrado o sujeto.

En la práctica se emplean piezas con espesores de 10  $\mu\text{m}$  a 3mm. Para tener alta sensibilidad, interesaría que fuera  $\alpha_B < 0$ , pero como no hay metales útiles con esta propiedad, se toma invar (acero al níquel), que tiene  $\alpha = 1.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ . Como metal A se emplean latones y otras aleaciones propiedad de los diversos fabricantes. Para microactuadores (micro válvulas) se emplean silicio y aluminio.

Estos dispositivos se emplean en el margen desde  $-75$  a  $+540^\circ\text{C}$ ; y particularmente desde 0 a  $300^\circ\text{C}$ . Se les dispone en voladizo, espiral, hélice, diafragma, etc., y se mide la fuerza o el desplazamiento. También se emplean directamente como actuadores para abrir o cerrar contactos (termostatos, control ON-OFF) y para protección en interruptores térmicos de circuitos eléctricos. En este último caso la comente se hace circular por el propio elemento, que se calienta por efecto joule hasta que alcanza una temperatura tal que ejerce una fuerza mecánica sobre un dispositivo que interrumpe el camino de la comente.

**3.2 Sensores de nivel.** El método más simple para medir el nivel de un líquido es sumergir una regla graduada y ver la longitud que queda mojada al extraerla, pero no se presta fácilmente a la automatización. Para obtener una señal eléctrica se puede emplear un flotador con una conexión mecánica, que en virtud del principio de Arquímedes, convierte el desplazamiento de la superficie libre en una fuerza o par, y éstos en un ángulo de giro. Otra posibilidad es emplear un flotador con una polea y un contrapeso: el ángulo girado por la polea es proporcional al nivel del líquido. Para evitar que el flotador derive por la superficie, se encierra en un tubo-guía. Para evitar el depósito de sustancias en su superficie tiene forma ahusada.

Una alternativa es medir la diferencia de presiones  $\Delta P$  entre el fondo del depósito y la superficie del líquido. La relación con la altura del líquido  $h$  es;

$$h = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (24)$$

donde  $\rho$  es la densidad del líquido y  $g$  la aceleración de la gravedad. Este método se puede aplicar tanto en depósitos abiertos como en depósitos cerrados a presión. En ambos casos, el desconocimiento exacto de  $\rho$  que depende del líquido y de la temperatura, es una fuente de error. Las posibles fugas en la toma de presión cercana al fondo, son otro problema a considerar.

Por último mencionaremos el método denominado de burbujeo, que evita la medida de presión en el fondo del depósito. Consiste en un tubo inmerso hasta las proximidades del fondo, y por el que hace circular un gas inerte a caudal constante que se ajusta hasta que se ven aparecer burbujas en el extremo del tubo. La presión en el tubo es igual entonces a la presión en la altura del depósito donde está el extremo del tubo.

Ahora veremos que sucede o cuales son las alternativas si existiese una falla en un sensor de nivel en un tanque de almacenamiento de líquido; en este caso se podría utilizar un sensor de presión, esto se puede llevar a cabo gracias a que como sabemos la presión en cualquier punto del tanque de almacenamiento es la misma, y como la presión es igual a la fuerza por área, esto nos permite realizar los cálculos correspondientes para poder evaluar el nivel del líquido en cualquier instante.

Por ejemplo; consideremos un tanque cilíndrico de almacenamiento de agua con un diámetro de 0.1397 m. ( $D_1$ ), y una altura de 0.762 m. ( $H$ ), abierto a la atmósfera, al nivel de la ciudad de México la presión atmosférica es de  $0.77 \text{ N / m}^2$  ( $P_a$ ), el nivel ( $y$ ) en el tanque se puede calcular en cualquier instante, resolviendo la siguiente ecuación para la presión:

$$P = P_a + \rho g y \quad (25)$$

Donde:

$P$  = Presión en el tanque.

$P_a$  = Presión atmosférica.

$\rho$  = Densidad del agua.

$g$  = Aceleración de la gravedad.

$y$  = Nivel del líquido.

Resolviendo para la altura o nivel tenemos

$$y \approx \frac{P - P_a}{\rho g} \quad (26)$$

Si el sensor de presión en el tanque nos da una medida de  $5782.77 \text{ N / m}^2$  por medio de la ecuación (26), encontramos que la altura del líquido (el nivel) es de 0.589 m.

Otra opción quizá un poco más práctica para sustituir un sensor de nivel sería utilizar sensores ópticos que pueden resultar un poco más caros pero igualmente efectivos para saber donde se encuentra dicho nivel, esto debido a las propiedades luminosas, y los índices de refracción de los líquidos, esto mediante la utilización de caldas fotoeléctricas que funcionan de acuerdo con los cambios en la resistencia, es decir, la resistencia aumenta o disminuye de acuerdo con los cambios de luz y dicho cambio en la resistencia es imputable al tipo de material que sea utilizado en cada caso.

**3.3 Sensores de flujo.** Es necesario distinguir entre flujo y caudal. Se denomina flujo al movimiento de fluidos por canales o conductos abiertos o cerrados. El caudal es la cantidad de material, en peso o volumen, que fluye por unidad de tiempo. Las medidas de caudal están presentes en todos los procesos de transporte de materia y energía mediante fluidos, bien sea para control de dichos procesos o como simple indicación, bien con la finalidad de determinar tarifas, como sucede en los casos del agua, gas, gasolina, o crudos, entre otros.

La mayoría de los caudalímetros se basan en métodos de medida indirectos y, en particular, en la detección de diferencias de presión provocadas por la inserción de un elemento en el conducto donde se desea medir. Para entender éste y otros métodos de medida de caudal, siquiera brevemente, se debe utilizar la teoría básica de flujo de fluidos.

Se denomina flujo viscoso o laminar al de un fluido a lo largo de un conducto recto, con paredes lisas y sección transversal uniforme, donde la trayectoria de cada una de las partículas es paralela a las paredes del tubo y con la misma dirección.

Por el contrario se habla de flujo turbulento cuando algunas de las partículas del fluido poseen componentes de velocidad longitudinal y transversal, y aparecen remolinos o torbellinos.

Para un fluido incompresible, en el que la gravedad sea la única fuerza interna, sin rozamientos, que fluya en régimen estacionario y sin que entre ni salga calor de él, se cumple el teorema de Bernouilli. Según éste, todo cambio de velocidad provoca un cambio de sentido opuesto en la presión, cambio que es igual al que experimenta la energía cinética de la unidad de volumen, sumado a cualquier cambio debido a la diferencia de nivel.

Es decir:

$$p + \rho gz + \rho v^2 / 2 = \text{constante} \quad (27)$$

donde:

$p$  = presión estática

$\rho$  = es la densidad del fluido (incompresible)

$g$  = es la aceleración de la gravedad

$z$  = es la altura geométrica respecto a un nivel de referencia

$v$  = es la velocidad del fluido en el punto considerado

$\rho v^2 / 2$  = se denomina presión dinámica

Un dispositivo simple, cuyo fundamento se puede describir mediante la expresión anterior, es el tubo de Pitot, empleado para determinar la magnitud de la velocidad de un fluido en un punto.

En el caso de un canal abierto, con un fluido incompresible y sin fricción y flujo unidimensional de dirección conocida, si se dispone un tubo en ángulo recto con una abertura dirigida aguas arriba, el líquido penetra en el tubo y sube lo suficiente para que se equilibre la presión de la columna líquida con la fuerza producida por la velocidad al impactar el fluido en la abertura. Dado que enfrente de ésta la velocidad es nula, las líneas de flujo se "reparten", creándose un punto de estancamiento. Se cumple pues:

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_2}{\rho g} = h_0 + h \quad (28)$$

y como, al ser un canal abierto,  $p_1 = p_2 = p_0$ , se tiene finalmente:

$$v^2 = 2gh \quad (29)$$

En un tubo cerrado hay que medir la presión estática mediante un manómetro y la presión total (o de estancamiento),  $p_t$ , mediante un tubo de Pitot. A partir de la ecuación 28 es fácil obtener la relación entre la velocidad y la diferencia entre ambas presiones, que resulta ser:

$$v^2 = 2(p_t - p) / \rho \quad (30)$$

El tubo de Pitot es utilizado frecuentemente en aviación para medir la velocidad del aire.

Los caudalímetros de obstrucción son, sin duda alguna, los más frecuentes, y su funcionamiento se puede describir también mediante la ecuación 28. Se denomina obstrucción a una restricción de flujo de área constante. En ella se produce una caída de presión que depende del flujo, según se demuestra seguidamente. De esta forma, la medida de caudal se reduce a una medida de presión diferencial.

Si en un conducto cerrado se interpone una placa con un orificio, hay una contracción de la vena fluida, que pasa de tener una sección transversal  $A_1$  (la del conducto) a una sección transversal  $A_2$  (la del orificio), y ello lleva asociado un cambio de velocidad. Dado que la masa se debe conservar;

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (31)$$

Por otra parte, la aplicación del teorema de Bernouilli lleva a;

$$p_1 + \rho g z_1 + \rho v_1^2 / 2 = p_2 + \rho g z_2 + \rho v_2^2 / 2 \quad (32)$$

Si  $z_1 = z_2$ , a partir de estas dos expresiones es inmediato obtener;

$$v_2^2 = \frac{2(p_1 - p_2) / \rho}{1 - (A_2 / A_1)^2} \quad (33)$$

El caudal teórico es  $Q = A_2 v_2$ , pero, el caudal real es algo inferior y se determina calculando experimentalmente un factor de corrección, denominado coeficiente de descarga,  $C_d$ , que depende de  $A_1$ ,  $A_2$  y otros factores. Su valor es del orden de 0.6. Se tiene así;

$$Q_r = C_d Q \quad (34)$$

Entre los principales inconvenientes de este método hay que señalar que impone una pérdida de carga apreciable y que es difícil medir con exactitud caudales fluctuantes, a no ser que el medidor de presión diferencial sea rápido (incluidos los efectos de las conexiones hidráulicas). Las denominadas toberas y venturímetros tienen igual fundamento, pero los perfiles son más suaves, de modo que la pérdida de carga es menor ( $C_d$  puede ser de hasta 0.97).

La aplicación del teorema de Bernoulli y del principio de conservación de la masa a la medida del caudal volumétrico, puede hacerse también de forma recíproca a la vista anteriormente. Es decir, se puede hacer variable la sección de paso del fluido y mantener constante la diferencia de presión entre ambos lados de una obstrucción. El caudal a medir está entonces relacionado con la sección de paso.

Los rotámetros son indicadores de caudal medio basados en este método. Consisten en un tubo de conicidad uniforme y un obturador ranurado, dispuesto en su interior, que es arrastrado por el fluido, a lo que se opone con su peso. El fluido, líquido o gas, circula de abajo arriba. Si aumenta el caudal, el obturador se eleva de modo que el área de paso sea mayor y la diferencia de presiones se mantenga constante. El desplazamiento del obturador indica así el caudal del fluido.

Para presiones inferiores a 3.5 kPa y líquidos que no sean totalmente opacos, el tubo puede ser de vidrio y llevar inscrita la escala donde se lee la posición del flotador. Para presiones elevadas y caudales altos el tubo debe ser metálico, detectándose entonces la posición del obturador de forma magnética. También se puede aplicar el método de medida por comparación mediante un flotador magnético y un solenoide lineal en el exterior del tubo. La posición del flotador se mide con un detector fotoeléctrico. El caudal se determina a partir de la comente que hay que suministrar al solenoide para reposicionar el flotador en la posición de referencia.

Los caudalímetros de turbina consisten en una rueda alabeada, dispuesta en el seno del fluido en movimiento, que provoca su giro con una velocidad proporcional a la del fluido, si ésta es suficientemente alta. La velocidad de giro de las paletas se detecta mediante un captador magnético.

En las corrientes de superficie libre, bien sea en canales abiertos, bien en tuberías que no estén completamente llenas, se emplean métodos de medida distintos a los vistos para tuberías a presión. Uno de ellos se basa en la utilización de vertederos.

Un vertedero de aforo consiste en una abertura practicada en la parte superior de una presa o pared perpendicular a la dirección del flujo, que provoca un estancamiento detrás de él de modo que el líquido se vierte a través de la abertura.

Se convierte así energía cinética del fluido en energía potencial, y el fluido alcanza una altura sobre el punto inferior de la abertura que es función del caudal. Para una abertura rectangular, por ejemplo;

$$Q = K L H^{3/2} \quad (35)$$

Donde:

Q es el caudal.

H la altura alcanzada,

L la anchura del vertedero

K una constante.

La medida de H puede hacerse mediante un sensor de nivel.

En el caso de que un sensor de flujo falle la alternativa más viable es la utilización de sensores de temperatura como es el caso de los termistores cuyas características son: detectan cambios muy leves de temperatura y se fabrican con la combinación sintetizada de material cerámico y alguna clase de óxido metálico semiconductor, como níquel, manganeso, cobre, titanio o hierro. En los termistores se tiene un coeficiente de resistividad térmica muy negativo, o algunas veces positivo. Para medir la resistencia en los termistores se utilizan principalmente los puentes de Wheatstone. Algunas de las ventajas de estos elementos son el bajo costo y que son de tamaño pequeño; sus principales desventajas son el no ser la relación de la temperatura con la resistencia lineal, así como el hecho de que generalmente se requieren líneas de fuerza blindadas.

La aplicación de estos sería principalmente para medir el flujo de gases, esto es algo que inclusive ya está siendo utilizado en la industria de procesos mediante un circuito en el que se colocan dos termistores, esto permite cerrar el flujo en un determinado instante en el que se está rebasando el máximo permisible.

Las ecuaciones para los **medidores de flujo** de orificio de precisión son complejas, sin embargo, probablemente en la mayoría de las instalaciones se utiliza la siguiente ecuación simple:

$$q = C \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (36)$$

donde:

q = razón de flujo

$\Delta P$  = caída de presión a través del orificio

C = coeficiente del orificio

$\rho$  = densidad del fluido

En la siguiente ecuación se observa que la caída de presión se relaciona con el cuadrado del flujo, o

$$\Delta P = \left( \frac{\rho}{C^2} \right) q^2 \quad (37)$$

En consecuencia, si se desea el flujo, entonces se debe obtener la raíz cuadrada de la caída de presión; algunos fabricantes ofrecen la opción de instalar una unidad de extracción de raíz cuadrada junto con el sensor y, en este caso, la señal que sale del sensor se relaciona de manera lineal con el flujo volumétrico. Un punto en el que se debe hacer énfasis es que no toda la caída de presión que se mide es pérdida por el fluido en proceso, sino que una cierta cantidad la recupera el fluido en los siguientes tramos de la tubería, conforme se restablece el régimen de flujo.

**3.4 Sensores de presión.** La medida de presiones en líquidos o gases es una de las más frecuentes, particularmente en control de procesos. Como sabemos la presión es una fuerza por unidad de área, ( $P = F/A$ ) y para su medida se procede bien a su comparación con otra fuerza conocida, o bien a la detección de su efecto sobre un elemento elástico (medidas por deflexión).

En los manómetros de columna de líquido, el resultado de la comparación de la presión a medir y una presión de referencia, si se desprecian efectos secundarios, es una diferencia del nivel del líquido  $h$

$$h = \frac{P - P_{ref}}{\rho g} \quad (38)$$

donde:  $\rho$  es la densidad del líquido y  $g$  la aceleración de la gravedad. Un sensor de nivel (fotoeléctrico, de flotador, etc.) permite entonces obtener una señal eléctrica.

Al aplicar una presión a un elemento elástico, este se deforma hasta el punto en que las tensiones internas igualan la presión aplicada. Según sean el material y la geometría empleados, el desplazamiento o deformación resultantes son más o menos amplios, pudiéndose aplicar luego unos u otros sensores. Los dispositivos utilizados derivan bien del tubo Bourdon bien del diafragma empotrado o sujeto por sus bordes.

En el caso de una lámina delgada de espesor  $e$  y radio  $R$ , con una diferencia de presión  $P$  entre ambas caras, si la máxima deformación central  $z$  es inferior a  $1/3$  del espesor, se cumple:

$$P = \frac{16Ee^4}{3R^4(1-\mu^2)} \left[ \frac{z}{e} + 0.4888 \left( \frac{z}{e} \right)^3 \right] \quad (39)$$

donde  $E$  es el módulo de Young y  $\mu$  el coeficiente de Poisson del material.

Si se van a usar sensores piezorresistivos, entonces interesa conocer la tensión mecánica en los distintos puntos del diafragma. Para el caso anterior en todos los puntos a la distancia  $r$  del centro, la tensión en dirección radial es:

$$\sigma_r = \frac{3PR^2\mu}{8e^2} \left[ \left( \frac{1}{\mu} + 1 \right) - \left( \frac{3}{\mu} + 1 \right) \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (40)$$

La tensión en dirección tangencial es

$$\sigma_t = \frac{3PR^2\mu}{8e^2} \left[ \left( \frac{1}{\mu} + 1 \right) - \left( \frac{1}{\mu} + 3 \right) \left( \frac{r}{R} \right)^3 \right] \quad (41)$$

La sensibilidad del diafragma aumenta con su área y con el inverso del cuadrado de su espesor. A lo largo y ancho del diafragma hay simultáneamente tracciones y compresiones, por lo que conviene disponer varias galgas y combinarlas en un puente de medida para tener efectos aditivos y compensación de temperatura.

Los materiales elásticos empleados son: cobre al berilio, aceros inoxidable, aleaciones níquel-cobre e incluso silicio en el caso de diafragmas que deban incorporar galgas extensométricas del mismo material.

Si el desplazamiento obtenido mediante un simple diafragma no es suficiente, se pueden emplear las cápsulas y fuelles. Las cápsulas como vimos en el capítulo anterior consisten en dos diafragmas apareados unidos por el borde y dispuestos en caras opuestas de la misma cámara. Los fuelles son cámaras flexibles con elongación axial, que ofrecen aún mayor deflexión que las cápsulas, pudiendo ser de hasta un 10% de su longitud. Pero unos y otros son sensibles a vibraciones y aceleraciones y no resisten sobrepresiones altas.

## **CAPITULO 4**

### **Especificaciones Técnicas sobre sensores**

América

**USA & Canada**

DWM & Associates, Inc.

Mr. David Molnar

52 Wisteria Street

Edison, NJ 08817

USA

Phone. +001-732-777-0020

Fax. +001-732-777-0911

E-mail: [sales@dwmai.com](mailto:sales@dwmai.com)

WWW: <http://www.dwmai.com/>

**all other countrys in America**

ABB Automation Products

APR-IE

Mr. Gerhard G. Fischer

Borsigstr. 2

D-63755 Alzenau

Germany

Phone. +49-6023-92-3390

Fax. +49-6023-92-3500

E-mail: [gerhard.g.fischer@de.abb.com](mailto:gerhard.g.fischer@de.abb.com)



ABB Automation Products

D-63755 Alzenau, Borsigstraße 2

Tel. +49-6023-92-3390

Fax. +49-6023-92-3500

E-mail: [info@sensycon.de](mailto:info@sensycon.de)

WWW: <http://www.sensycon.de/>

**Hartmann&Braun**

Perfil del auspiciador: Foxboro/Invensys Process System

[En su última edición Fieldbus Facts comenzó con la presentación de los perfiles de las mayores empresas y organizaciones que auspician Fieldbus Foundation. Estos perfiles incluyen datos básicos de los auspiciadores; su filosofía en relación a la tecnología de FOUNDATION fieldbus; una descripción de los productos aceptados por FOUNDATION fieldbus y sus servicios; y un examen de las aplicaciones donde han sido aplicados estos aparatos].

Nombre de la empresa: Foxboro/Invensys Process Systems  
Dirección de correo: 33 Commercial St., C41-2C, Foxboro, MA 02035, USA.  
Persona de contacto: Sr. James O. Gray, Director de Marketing; Teléfono: +1-508-549-2491;  
e:mail: [jgray@foxboro.com](mailto:jgray@foxboro.com); sitio del web: <http://www.foxboro.com>.  
Miembro desde: 1993, un miembro fundador

¿Por qué apoya a FF?: La empresa Foxboro, que ahora es parte de la unidad de Invensys Process Systems de Invensys plc, piensa que los estándares abiertos e interoperables como los de FOUNDATION fieldbus son los de mayor interés para sus clientes. La empresa Foxboro/Invensys está comprometida a apoyar la gama de estándares que requieren sus clientes en el mundo entero. Foxboro ha sido un participante activo desde mediados de los años 80. Esto incluye su membresía en los comités originales del ISA SP50 y en las posiciones de liderazgo tanto en el Proyecto de Sistemas Interoperables (Interoperable Systems Project, ISP, en inglés) y en la Fieldbus Foundation de nuestros días. En años recientes, Foxboro/Invensys ha asumido una posición líder en el desarrollo de las especificaciones para los estándares emergentes de HSE FOUNDATION fieldbus.

Habiendo adoptado tempranamente la tecnología de fieldbus, Foxboro ha diseñado su sistema de automatización de las Series I/A con una arquitectura fieldbus basada en estándares multiligados. Como resultado, los clientes de Foxboro, se han dado cuenta de los grandes beneficios del fieldbus digital, tales como una fácil instalación y costos bajos de mantenimiento, desde los finales de 1980. Gracias al surgimiento de FOUNDATION fieldbus, estos beneficios se han extendido al ambiente de muchos vendedores. Hoy en día, los usuarios de los sistemas de automatización de Foxboro se pueden integrar digitalmente a otros aparatos de campo ya registrados de FOUNDATION Fieldbus, mientras que los usuarios de otros sistemas de vendedores se pueden integrar digitalmente a los aparatos de campo registrados en FOUNDATION de Foxboro. Esto es bueno para todos.

Productos y servicios: En 1998, el primer transmisor diferencial de presión de Foxboro pasó la prueba de interoperabilidad de capa para el usuario de Fieldbus Foundation. Desde ese momento, muchos productos de Foxboro – que incluyen los transmisores multivariables de temperatura y presión, medidores de flujo y posicionadores – han sido registrados totalmente por la foundation. También está completamente registrado un actuador fabricado por Limotorque, una empresa hermana de Invensys.

Además, el sistema de control de la serie I/A de Foxboro proporciona un apoyo importante, tanto para los segmentos locales como para los lejanos, de FOUNDATION fieldbus. Este apoyo es provisto dentro del mismo subsistema I/O montado en carril DIN y el ambiente de ingeniería utilizado para los aparatos de contacto de campo y los 4-20 mA convencionales, así como el FoxCom perteneciente a Foxboro y otros protocolos de campo digitales. El software de los módulos de fieldbus H1 automáticamente instala el Programador de Conexión Activo (Link Active Scheduler) para cada bloque de función en el segmento H1 lo que permite una operación de enchufe y acción en todos los aparatos registrados en la FOUNDATION. Todas estas capacidades pueden tener la ventaja de aprovechar la proposición relativamente fácil y de bajo riesgo de las Series I/A utilizadas en las plantas nuevas o ya existentes.

#### Aparatos registrados:

- § Transmisor de presión diferencial Foxboro IDP10
- § Transmisor de presión diferencial de gama amplia Foxboro IDP25
- § Transmisor de presión diferencial de gran calidad Foxboro IDP50
- § Transmisor de presión absoluta Foxboro IAP10 (directamente conectado)
- § Transmisor de presión absoluta Foxboro IAP20 (montado en un caño)
- § Transmisor de medición de presión Foxboro IGP10 (conectado directamente)
- § transmisor de medición de presión Foxboro IGP20 (montado en un caño)
- § Transmisor multivariable Foxboro IMV25
- § Medidor de flujo de vórtice de la serie Foxboro E83
- § Medidor de flujo magnético Foxboro IMT25
- § Transmisor de temperaturas Foxboro RTT25-F1 (de ingreso simple)
- § Transmisor de temperaturas Foxboro RTT25-F2 (de ingreso doble)
- § Posicionador Foxboro/Eckardt SRD991
- § Actuador Limotorque MX

Aplicaciones fieldbus típicas: Los productos Fieldbus de Foxboro son utilizados en todas las industrias de procesos: químicos, aceite y gas, pulpa y papel, polvos, minerales y minería, alimentos y bebidas, farmacéuticos y otros.

Las aplicaciones específicas varían desde el monitoreo básico y adquisición de datos hasta el control de misión crítica.

---

El distribuidor de Multibarrera fieldbus de la empresa ABB disminuye costos y aumenta su disponibilidad

---

El modelo Multibarrera MB204-Ex de la empresa ABB (Warminster, Pa.; Rochester, N. Y.) es un distribuidor fieldbus de cuatro pliegues para trabajar en áreas peligrosas y no peligrosas. Instalado en un segmento Intrínsecamente Seguro (IS) (área peligrosa Zona 1), aumenta el número de aparato por bus, ofrece flexibilidad y reduce el costo del suministro de energía y cables en aproximadamente un 30%.

Cuando es conectado al segmento fieldbus de baja velocidad, detrás del segmento del conector/enlace, el multibarrera asegura el suministro IS de hasta cuatro instrumentos. Ya que las barreras pueden ser "en cascada", se pueden operar hasta 32 instrumentos de campo en un segmento conector en el área peligrosa. El multibarrera hace esto sin necesidad de un abastecimiento de energía separado.

En una instalación convencional EEx i, un cortocircuito conducirá a la falla de un segmento completo con hasta 10 nudos. El multibarrera de ABB proporciona un aumento en la comunicación de los instrumentos de campo a través de una red de trabajo bus a prueba de corto circuito. De manera que si ocurre un cortocircuito en algún instrumento, sólo se ve afectado esa conexión individual, mientras que la conexión general del segmento bus permanece totalmente funcional.

## INTERRUPTORES POR AIRE



- ◆ Sistemas remotos no eléctricos
- ◆ A prueba de agua ,no ofrecen riesgo de descarga eléctrica, incluso tras sufrir danos
- ◆ Inmunes a Emisiones Electromagnéticas (EMC) agua, suciedad, polvo y gases inflamables
- ◆ Fácil instalación por personal no técnico
- ◆ Comparables, o incluso de inferior coste , que otros controles eléctricos convencionales
- ◆ Eliminan la necesidad de cumplir con multitud de normativas y estándares internacionales
- ◆ Amplia gama de opciones de accionamiento del interruptor
- ◆ Accionamiento muy sensible para empleo por personas con disminuciones físicas

## SENSORES DE VACIO Y PRESION



- ↔ Disponibles en presiones o vacíos de accionamiento desde 2,5 bar hasta 13.78 bar
- ↔ Contactos de uno o dos polos
- ↔ Opción de contactos acabados en oro o plata según sus especificaciones
- ↔ Opción de diafragma con un material resistente a productos químicos corrosivos
- ↔ Opción de montaje en circuito impreso (PCB)
- ↔ Interruptores de muy bajo coste para empresas que requieran grandes cantidades de los mismos ( a una presión de accionamiento prefijada )
- ↔ Muy buena fiabilidad en la presión de accionamiento
- ↔ Presión diferencial, creciente o decreciente
- ↔ Calibración y fijado de la presión de activación en fábrica disponible
- ↔ Especialmente adecuados para aplicaciones en procesos químicos, pruebas de estanqueidad, máquinas de bebidas y en instrumental médico

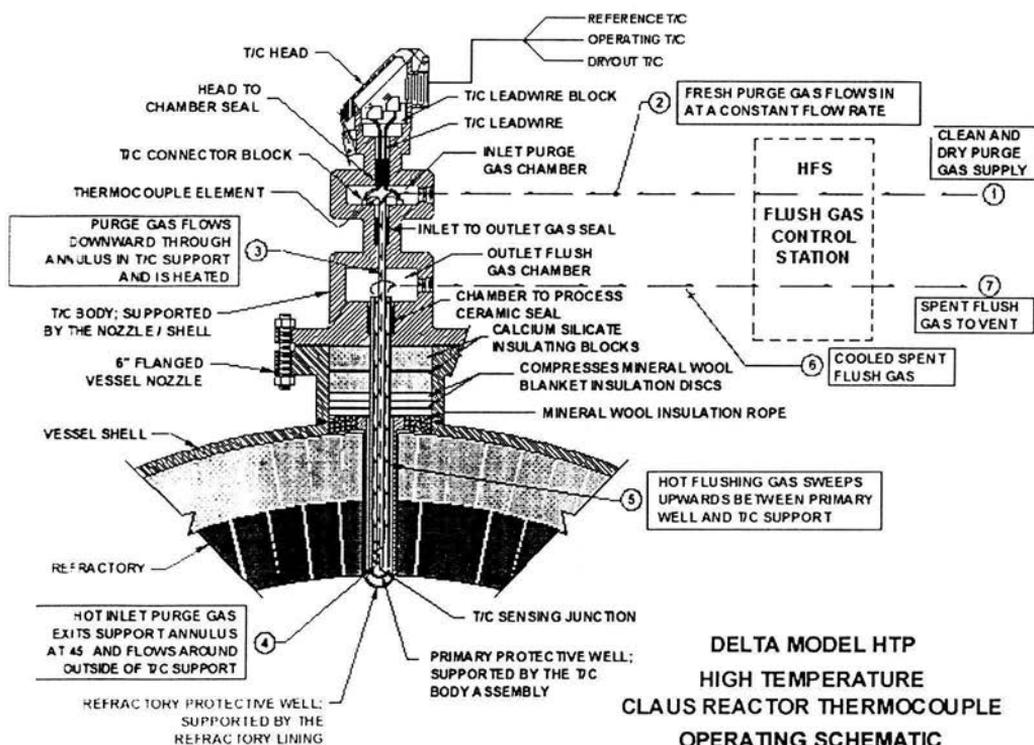


## **DELTA CONTROLS CORPORATION**

*Sensores Diseñados para Servicios Difíciles*

- Norma mundial para la protección de los reactores Claus
- Mantiene su exactitud en las condiciones severas  
Protégé y entiende la vida útil de la camisa del refractario y aumenta la tiempo de producción del reactor
- Más que 25 años de los resultados probados en cientos de instalaciones mundial
- Funciona precisamente en el servicio de azufre mucho tiempo después de otros diseños de termopar y los dispositivos infrarrojos fallan or comienzan leer incorrectamente
- Seguro. Sellado triple. Válvula de bloqueo es opcional
- Exactitud está verificada continuamente
- Termopar integro de desecar de refractario se lee hasta  $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$
- Capabilidad de servicio y piezas mundial
- Se usa también en los incineradores de proceso, unidades de POX y gasificadores de carbón
- Diseños especiales hasta 70 MPa o 2200°C





- Tipos de Termopar:** Platino/rodio es básico para los sensores de operación y referencia. Cobre/constantano es básico para los sensores de desecar y arranque.  
**Material de Cuerpo/Brida:** Acero de carbón A-106 y A-105  
**Adorno, Tornillos y Asientos:** Acero inoxidable 304 y 316  
**Pozo de Elemento:** Cerámica de alúmina mezclado  
**Pozo de Refractario:** Alúmina que es mezclada con las cerámicas resistente al choque  
**Brida de Montaje:** 6"/150# ANSI es básica  
**Gas de Baldeo:** Nitrógeno o aire, limpio y seco  
**Presión de Trabajo:** 1 MPa @ una temperatura de recipiente/piel de 260°C es básica  
**Temperatura de Trabajo:** Hasta 1700°C para la temperatura de gas del proceso.

- **Tipos de Termopar ISA:** B, K, R, S, T y W
- **Material de Cuerpo:** Acero inoxidable 316 o Hastelloy C
- **Tornillos:** Pernos A354-B, tuercas A194-3
- **Elemento de Termopar:** Certificado como preciso, documentado y conectado a NIST
- **Temperatura de Operación:** Hasta 2200°C
- **Brida:** Otras regímenes de ANSI, JIS Y DIN
- **Accesorios:** Partes para la purga, indicador de presión y caudal, válvula de caudal, válvula de flujo excesivo
- **Seguridad Máxima:** Válvula de bloqueo de reverso para evitar la posibilidad ligera que cantidades pequeñas de los compuestos de azufre pueden escapar por un periodo de tiempo corto.

# Instrumatic®

Ithaco

Esta compañía ofrece la siguiente instrumentación electrónica:

- Amplificadores Lock-In cubriendo el rango 0.1 Hz - 200 kHz.
- Sistemas de amplificador Lock-In de alta frecuencia, hasta 10 MHz.
- Preamplificadores de corriente y voltaje de bajo ruido.
- Choppers ópticos de frecuencia variable cubriendo el rango 0.1 Hz - 10 kHz con capacidad de sincronización y operación en doble frecuencia.
- Filtros electrónicos.
- Amplificadores de instrumentación AC.

Para más información solicite catálogo.

## MMR Technologies, Inc.

MMR es la única compañía, a nivel mundial, que fabrica refrigeradores basados en el efecto Joule-Thomson con Nitrógeno gas. El gas se introduce en el refrigerador a alta presión y al expandirse en los microcanales del refrigerador se licua produciendo el enfriamiento en la plataforma de refrigeración con un área de 1 cm<sup>2</sup>. Dicha plataforma incorpora un heater y un diodo para hacer una variación controlada de la temperatura. Por último, el refrigerador se monta en una cámara Dewar que dispone de distintas configuraciones y ventanas para cubrir las siguientes aplicaciones, en el rango de temperaturas desde 70 K hasta 580 K (ampliable a 730 K):

- Espectroscopía Raman, fluorescencia, transmisión y absorción óptica, microscopía óptica y electrónica, etc.
- Caracterización eléctrica y/o óptica de semiconductores y dispositivos electrónicos.
- Efecto Hall por método Van der Pauw y efecto Seebeck.
- Difractómetros de rayos X.

Para más información solicite catálogo o consulte en <http://www.mmr.com/>

## Avantes

Avantes es la compañía líder, con la serie S2000, en el diseño y fabricación de espectrómetros y espectrofotómetros miniaturizados con entrada por fibra óptica para aplicaciones en el UV, VIS y NIR. Están basados en un diseño de óptica integrada, sin partes móviles, recogiendo la luz mediante fibra óptica y dispersandola en un detector lineal de Silicio de 2048 pixels. Proporcionan resoluciones desde 0.3 nm hasta 10 nm dependiendo de la red de difracción y rendija de entrada seleccionada.

El S2000 viene acompañado con un convertidor A/D para ordenador de sobremesa y software en Windows. No obstante, puede configurarse para trabajar con ordenadores portátiles con bus PCMCIA. Además incorpora un conector SMA que permite acoplar una amplia línea de fuentes de luz y sondas por fibra óptica, sensores químicos y otros accesorios.

Para más información solicite catálogo o consulte en <http://www.avantes.com/>

## The Optometrics Group

Optometrics es la compañía líder en la fabricación de mini-monocromadores, con la serie Mini-Chrom, ideales para aplicaciones OEM e investigación. Su diseño compacto y de reducido peso le hacen el componente óptico principal en detectores HPLC, instrumentación de medida del color, espectrofotómetros UV-VIS, instrumentación analítica y química, etc. Dispone de una amplia selección de redes de difracción para cubrir el rango entre 190 nm y 2.2 micras, además de fuentes de luz, detectores de Silicio y Germanio, fotomultiplicadores, cámaras de muestras para operar en transmisión y reflexión y esferas integradoras. Con todos estos accesorios "plug & play" se pueden configurar espectrofotómetros modulares y compactos.

Por otro lado, Optometrics fabrica el espectrofotómetro SPF-290S diseñado para determinar el Factor de Protección Solar en lociones, cremas, sprays, aceites, cosméticos y geles. Consiste en un sistema completamente automatizado que proporciona una correlación extremadamente alta entre los valores obtenidos "in-vivo" y los obtenidos "in-vitro" con el espectrofotómetro.

Para más información solicite catálogo o consulte en <http://www.optometrics.com/>

## Toptica

TuiOptics comercializa el diodo láser DL100 estabilizado y sintonizable, para aplicaciones de espectroscopía de alta resolución, metrología, interferometría, espectroscopía Raman y análisis de gases. Originalmente, fue diseñado para laboratorios de enfriamiento atómico por láser donde requieren una anchura de línea láser de 1 MHz y máxima potencia. El DL100 consiste en una cavidad resonante externa formada entre el diodo láser y la red de difracción operando bajo condiciones de Littrow. Así la anchura de línea es drásticamente reducida y la longitud de onda del diodo controlada moviendo la red de difracción. Proporciona potencias de hasta 100 mW, anchura de línea menor de 1 MHz y 15 nm de sintonización para cada diodo. Como opciones incorpora un doblador de frecuencia y etapas de amplificación. TuiOptics también comercializa láseres de excímero en un diseño ultracompacto de 650 x 460 x 270 mm. Utilizan preionización para alcanzar razones de repetición de hasta 500 Hz y optimizar el tiempo de vida del láser. Para más información solicite catálogo o consulte en <http://www.toptica.com/>

## Renishaw

Renishaw es la compañía pionera en el desarrollo de una nueva generación de espectrómetros para microscopía Raman. El sistema combina un simple monocromador junto con un filtro interferencial Notch para eliminar la línea Rayleigh, evitando usar dobles o triples monocromadores y láseres de alta potencia que pueden dañar la muestra. A través de un microscopio óptico se focaliza en la muestra la excitación láser con una resolución espacial de 1  $\mu\text{m}$  y se recoge el espectro Raman a la salida del monocromador con un detector CCD de 400x600 pixels refrigerados por Peltier. El sistema permite realizar microscopía confocal con una resolución de 2  $\mu\text{m}$ , una resolución espectral de 1  $\text{cm}^{-1}$ , pudiendo llegar a 0.2  $\text{cm}^{-1}$ , y un desplazamiento Raman  $<70 \text{ cm}^{-1}$  a 7000  $\text{cm}^{-1}$ . Además permite tomar imágenes Raman de una zona de la muestra y realizar mapeados.

El espectrómetro Raman puede configurarse con distintas excitaciones láser: 325/442 nm (HeCd), 229 nm, 244 nm, 488 nm(Ar+), 514.5 nm (Ar+), 632.8 nm (HeNe) y 780 (Diodo NIR) y viene acompañado con el software para espectroscopia GRAMS 32C que automatiza el sistema.

Para más información solicite catálogo o consulte en <http://www.renishaw.com/>

## Thorlabs, Inc.

Thorlabs incluye en su extenso catálogo los siguientes productos:

-Componentes Opto-Mecánicos

\* Monturas para espejos y lentes.

\* Mesas ópticas y hardware óptico.

\* Cabezas micrométricas.

\* Posicionadores piezoeléctricos.

- Componentes Opto-Electrónicos

\* Medidores de potencia laser.

\* Amplificadores lock-in y choppers.

\* Diodos Laser.

\* Detectores de alta velocidad.

\* Moduladores de cristal líquido.

- Fibra Optica mono-modo y multi-modo. Kits de conectorización

Para más información solicite catálogo.

## Astro-Med, Inc.

Astro-Med es líder mundial en sistemas de adquisición de datos autónomos y portables con gran capacidad de almacenamiento y registro en papel con gráficos de alta calidad. Estos sistemas incluyen 9 Gb de almacenamiento, diversos tipos de conectores para las entradas (AC, DC, Termopares, puentes), pantalla programables de visualización, registradora, filtros (LP, HP, Notch) así como análisis de señales en tiempo real. Los sistemas son configurables en el número de canales 2, 4, 6, 8, 16, 18, 32 etc... Aunque los sistemas funcionan autónomo, también se pueden conectar a un ordenador ya sea para descargar datos ó para programarlos. Estos instrumentos se utilizan en todo tipo de empresas (eléctricas, químicas, aviónica, naval, transportes, telecomunicaciones etc..) y universidades, por su robustez y fiabilidad y sirven para monitorizar señales, investigación, reparación de sistemas, telemetría (incluye IRIG), pruebas de coches, motores, etc.. En general donde haya señales, transductores ó sensores que tenga que controlar ó verificar. <http://www.astro-med.com/>

### Walker Scientific Inc.

Walker ofrece en su catálogo una amplia variedad de dispositivos magnéticos:

- Instrumentación de medidas magnéticas: Gausímetros, Fluxímetros, Magnetómetros, Monitores de campo magnético, Histeresisgrafos e Imanes de referencia.
- Sistemas de electroimanes: Electroimanes de laboratorio de 4" - 15", Electroimanes de haz iónico, Bobinas Helmholtz, Sistemas de solenoide y Electroimanes a medida.
- Tomas de corriente regulada: Corriente regulada, Voltaje regulado, Campo magnético regulado.
- Equipos de pruebas no destructivas: Identificación y Clasificación de aleaciones.
- Sistemas de carga y acondicionamiento de imanes: Descarga capacitiva, Medio ciclo, Corriente directa (CD).

Para más información solicite [catálogo](#).

### Terahertz Technologies, Inc.

Terahertz ofrece la siguiente gama de productos:

- R752 Radiómetro para medidas de potencia y energía. Formado por un sensor piroeléctrico que permite medir desde 20  $\mu$ W a 100 W, y desde 50 nJ a Julios en el rango espectral desde UV a Infrarrojo lejano. También permite hacer medidas de fuentes pulsadas.
- C980, Chopper óptico de velocidad variable cubriendo el rango 4 Hz - 4 kHz. Proporciona lectura directa en Hertz en un LED de 4 dígitos y puede ser controlado externamente.
- TIA-500, Convertidor opto-electrónico. Convierte una señal de fibra óptica en electrónica con un ancho de banda de 125 MHz. Permite acoplamiento AC y DC y conectores ST o FC de fibra. Dispone de un detector de silicio para 400-1000 nm y InGaAs para 900-1700 nm.
- PDA-700, Amplificador de bajo ruido. Proporciona una lectura directa de la corriente generada por un fotodiodo, fotomultiplicador o cualquier fuente de corriente. Tiene un rango de escala entre 20 nA y 2 mA con un ruido <1 pA.
- FM-1600, Multiplexor de fibra óptica. Admite hasta 8 fibras de 200-600 micras y se puede controlar por RS-232.

Para más información solicite catálogo o consulte en [www.borq.com/](http://www.borq.com/)

### Logical Devices

Desde 1980 Logical Devices ofrece una línea completa de herramientas para todo tipos de memorias programables. Desde los programadores autónomos y borradores para EPROM hasta los mas universales, las líneas ALLPRO y XPRO. También ofrece el conocido software CUPL usado por mas de 30.000 ingenieros para el desarrollo, simulación y optimización de programas para PLD y FPGA.

Para más información solicite [catálogo](#).

### Broadway

Broadway es una solución completa, para captura, edición y compresión MPEG-1 de video, compuesta por una tarjeta PCI y el software de aplicación, que permite añadir video comprimido con calidad similar a VHS a las aplicaciones multimedia basadas en Windows 95 y NT 3.51 ó 4.0.

Broadway nos permite elegir dos maneras distintas de operar respecto a la generación de video comprimido (Formato MPEG-1 I,P,B, Frames): Comprimir al formato MPEG-1, directamente desde la fuente de video, en tiempo real. La otra opción nos permite generar ficheros AVI editables, de la siguiente manera: Broadway captura en color y en tiempo real imágenes de video compuesto o S-video a razón de 25 imágenes/seg. (incluyendo el audio), almacenando la información en el disco duro en formato MPEG editable (.AVI).

Posteriormente, utilizando el software MediaStudio (incluido en Broadway), se realizan las tareas de edición. Una vez finalizada esta, Broadway comprime el fichero AVI a formato MPEG-1 en 3 veces tiempo real (3 minutos para comprimir un video-clip de 1 minuto), con un factor de 200:1 (9MB por cada minuto de video).

Broadway, tiene además entre muchas otras las siguientes virtudes a reseñar: Salida de S-video y compuesto, compresión a MPEG-1 de ficheros AVI que no hayan sido generados a través de Broadway, uso de los ficheros de video MPEG con paquetes de autor de VideoCD, etc.

El fichero de video comprimido con Broadway puede insertarse posteriormente en otras aplicaciones Windows como son: Power Point, Macromedia Director, Front Page, Web Graphics Suite, etc.

Para su utilización Broadway requiere un Pentium a 100 MHz. para capturar AVI o un Pentium 133 MHz, 16 MB de RAM, Windows 95 o NT, tarjeta gráfica Super-VGA y una tarjeta de audio compatible Sound Blaster.

Para más información solicite catálogo o consulte en <http://www.b-way.com/>

### Emulation Technology

Esta compañía ofrece más de 4.000 adaptadores y accesorios de todo tipo para facilitar la interconexión de los sistemas de desarrollo para emulación, análisis lógico y programación a los diferentes encapsulados de los circuitos integrados disponibles en el mercado hoy en día: BGA, PGA, PLCC, PQFP, LCC, SOIC, SSOP, TSOP, DIP, etc.

La gama de productos para interconectar los prototipos a la instrumentación incluye:

- Adaptadores para sondas de emulador.
- Adaptadores para programadores de memoria.
- Adaptadores para analizadores lógicos.
- Adaptadores para prototipos.
- Accesorios (clips, puntas de prueba, zocalos,...), para depuración y testeo.

Para más información solicite catálogo o consulte en <http://www.emulation.com/>

### Gamry Instruments

Los sistemas de Gamry para realizar medidas electroquímicas están basados en tarjetas ISA para ordenador, junto con software de aplicación de 32-bits para Windows 95/98.

Del hardware, compuesto por tarjeta Potenciostato/Galvanostato y tarjeta controladora caben destacar las siguientes prestaciones:

- Resolución de hasta 1 fA y 1 microV.
- 9 décadas con autorango para medidas en corriente.
- Analizador de Respuesta en Frecuencia (FRA), incorporado en la tarjeta.
- Medida de impedancias hasta 10<sup>13</sup> Ohmios.

Ofrece diversas aplicaciones de software electroquímico que permiten realizar medidas de corrosión, espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), ruido electroquímico, etc.

Para más información solicite catálogo o consulte en <http://www.gamry.com/>

### Glassman High Voltage

Este fabricante, especialista en fuentes de alimentación, ofrece en su catálogo una de las ofertas más amplias en fuentes de alto y bajo voltaje.

Sus fuentes de alimentación DC de alta tensión son regulables en corriente y voltaje, caracterizándose por una excelente estabilidad y eficiencia junto a un reducido tamaño. Cientos de modelos permiten elegir al usuario la fuente más adecuada a sus requerimientos. El rango de voltajes de salida abarca desde los 0-1 KV a los 0-600 KV, y las potencias disponibles desde los 15 W a los 15 KW.

Las fuentes de alimentación DC de baja tensión ofrecen voltajes de salida desde 0-8 V hasta 0-600 V, con potencias de 1000 W y 3000 W.

Asimismo, Glassman suministra una gama completa de fuentes de alimentación AC programables, que ofrecen una salida de 0-300 VAC, frecuencias de 45-500 Hz. y de 15 Hz. a 2 KHz., y potencias desde los 600 W a los 9 KW.

Para más información solicite catálogo.

### Hinds Instruments, Inc.

Hinds fabrica una línea completa de moduladores fotoelásticos (PEM-90) diseñados para modular la polarización de un haz monocromático en aplicaciones desde el UV de vacío al Infrarrojo. El PEM-90 opera cambiando o detectando el estado de polarización a una frecuencia fija (20 kHz - 84 kHz) y se presenta en dos configuraciones, rectangular (Serie I) y octogonal (Serie II).

	Frecuencia	1/4 (Desfase)	1/2 I (Desfase)	Apertura
Serie I	20 kHz - 50 kHz	130 nm - 2 $\mu$ m	130 nm - 1 $\mu$ m	16 mm - 22 mm
Serie II	37 kHz - 84 kHz	170 nm - 20 $\mu$ m	170 nm - 20 $\mu$ m	14 mm - 29 mm

#### Aplicaciones:

- Medida de birrefringencia.
- Elipsometría.
- Polarimetría de Stokes.
- Espectroscopía diferencial.
- Rotación óptica.
- Dicroísmo circular y lineal.
- Dicroísmo circular magnético.
- Espectroscopía FTIR.
- Efecto Kerr- Magnético.
- Choppeado óptico.

Para más información solicite catálogo.

### HMI

HMI (Huntsville Microsystems, Inc) es especialista en emuladores en tiempo real para microprocesadores, conectables a ordenador, incluyendo depuradores en lenguajes de alto nivel. HMI soporta los siguientes microprocesadores:

- Z80
  - 8085
  - 64180, Z180
  - 8031, 8051 Familias
  - 8096, 80196 Familias
  - 6809
  - 68HC11
  - 68HC16Z1 / Z2
  - 68HC16Y1
  - 68000, 68010, 68HC000
  - 68020, 68EC020, 68LC020
  - 68030, 68EC030, 68LC030
  - 68040, 68EC040, 68LC040
  - 68302, LC302 (3.3v ó 5v), PM302, EN302
  - 68306
  - 68307 (3.3v ó 5v)
  - 68330, 68331, 68332, 68F333, 68340
  - 68349 (3.3v ó 5v), 68360
  - 68356
  - 68060
  - PowerPC Motorola MPC505
  - PowerPC Motorola MPC801
  - PowerPC Motorola MPC821
  - PowerPC Motorola MPC823
  - PowerPC Motorola MPC860
  - PowerPC IBM 403 GA, GB, GC, GCX
- Para más información solicite catálogo.

### Impuls

El software VISION de Impuls constituye un conjunto de potentes herramientas de 32-bits para adquirir, procesar, y analizar imágenes en Windows 95 y Windows NT. Su oferta de productos incluye soluciones interactivas con una interface gráfica sencilla de usar, con diferentes niveles de prestaciones para que el usuario pueda adquirir justo el software que mejor se ajuste a las necesidades de su aplicación. Además, se encuentra disponible la librería SDK para C/C++ con todos los algoritmos de procesamiento, que permite su utilización para desarrollar aplicaciones a medida. Un PC con el software VISION, se convierte en una potente estación de trabajo para realizar procesamiento y análisis digital de imágenes en tareas tales como: conteo y clasificación de células en el laboratorio; desarrollo de algoritmos y soluciones para aplicaciones industriales; automatización de medidas de objetos, etc.

El software soporta imágenes de 8, 16, 24 y 48 bits, así como tarjetas digitalizadoras de imágenes de video.

Para más información solicite catálogo o consulte en <http://www.impuls-imaing.com/>

**International Light, Inc.**

Esta firma ofrece una amplia gama de instrumentación y detectores para medida de la luz, además de sistemas preconfigurados y calibraciones traceables del Instituto Americano NIST.

**Aplicaciones:**

- Radiometría y fotometría.
- Desinfección por UV.
- Fototerapia.
- Radiación Solar.
- Potencia Láser y LED.
- Protección radiación UV.
- Curado por UV.
- Crecimiento de plantas.
- Fotoprocesado.
- Oceanografía.
- Lámparas flash.
- Seguridad laboral.

Para más información solicite catálogo o consulte en <http://www.intl-light.com/>

**ROPER SCIENTIFIC**  
**ACTON RESEARCH**

Acton Research ofrece la serie SpectraPro de monocromadores y espectrógrafos con longitudes focales de 150, 300, 500 y 750 mm y las siguientes características:

- Óptica corregida de astigmatismo y capacidad de formar imagen.
- Triple torreta para indexar hasta tres redes de difracción.
- Rendijas de entrada y salida motorizadas.
- Motor paso a paso controlado por microprocesador de 32 bit.
- Interfaces RS-232 y GPIB con software de control en Windows.
- Amplia selección en redes de difracción.
- Tres años de garantía

Junto con esta serie, Acton Research dispone de otra instrumentación:

- Serie AM de monocromadores de alta resolución. Focales desde 0.5 m hasta 2 m.
- Serie VM de monocromadores de vacío con longitudes focales de hasta 3.0 m.

Monocromadores tipo Seya-Namioka y de incidencia rasante.

- Serie UHVM de monocromadores de ultra-alto vacío de 1.0 y 3.0 m longitud focal.
- Completa selección en fuentes de luz, detectores, cámara de muestras, software y electrónica para espectroscopía, etc.

Para más información solicite catálogo o consulte en <http://www.acton-research.com/>

### Cambridge Research & Instrumentation, Inc.

CRI diseña y fabrica los siguientes dispositivos ópticos basados en cristal líquido:

- VS-RGB Filtro sintonizable para seleccionar los tres colores RGB en aplicaciones de imagen con cámaras monocromo.
  - LCTF Filtros sintonizables para el rango espectral VIS-NIR. Permiten seleccionar cualquier longitud de onda en dicho intervalo.
  - LPC Controlador de potencia láser. Permite regular y fijar la intensidad del láser a un nivel seleccionado. Funciona con láseres continuos o pulsados y se puede controlar por RS-232 y GPIB.
  - SLM-128 Modulador espacial. Formado por un array lineal de 128 pixels de  $97 \mu\text{m} \times 2 \text{mm}$  con un gap entre ellos de  $3 \mu\text{m}$ , permite variar la fase o intensidad de un haz láser.
- Para más información solicite catálogo o consulte en <http://www.cri-inc.com/>

### CRYO Industries of America, Inc.

Cryo Industries es una compañía con amplia experiencia en instrumentación para criogenia fabricando equipos standard o según especificaciones. Ofrece:

- Criostatos de temperatura variable de Helio y Nitrógeno líquido.
- Criostatos de flujo continuo de Helio y Nitrógeno líquido. Muestra en vacío o en vapor.
- Criostatos de ciclo cerrado. Muestra en vacío o en gas de "change".
- Sistemas superconductores magneto-ópticos de temperatura variable.
- Imanes partidos superconductores con hueco a temperatura ambiente.
- Sistemas para espectroscopia Mossbauer.
- Dewars de Nitrógeno y Helio líquido.
- Tubos de transferencia de Helio líquido.
- Controladores y sensores de temperatura.
- Medidores de nivel de Nitrógeno y Helio líquido.

Para más información solicite catálogo o consulte en <http://www.cryoindustries.com/>

### ICS

<http://www.icselect.com/>

### Datascan Technology

Los módulos Datascan de adquisición de datos utilizan una red RS-485 para su distribución en planta. Esto permite a los módulos estar alejados hasta 1,2 Km. del ordenador de control, al cual se conectan a través de una RS-232 aislada.

Cada módulo contiene un convertidor A/D de 16 bits, con 8 ó 16 canales programables individualmente en función del tipo de sensor al que se conecten, siendo posible conectar a un mismo módulo y sin acondicionamiento previo, señales de termopares, Pt100, galgas extensiométricas, V, mV y 4-20 mA. Los módulos son expandibles localmente hasta 256 canales mediante multiplexores, siendo 1000 el número máximo de canales para todos los módulos en la red RS-485. Hay disponible software para la configuración de los canales y la adquisición y monitorización de los datos.

Para más información solicite catálogo.

## **Data Translation**

Desde hace 25 años, Data Translation ofrece a sus clientes productos para Adquisición de datos y productos para Análisis de imágenes con arreglo a los más altos estándares de calidad disponibles en el mercado.

- Sus soluciones para adquisición de datos con PC, incluye un amplio rango de tarjetas para los buses PCI, ISA y PCMCIA, con convertidores A/D y D/A de 12 y 16 bits y frecuencias de muestreo de hasta 1,25 Mmuestras/sg; junto con librerías y software de programación gráfica para Windows 3.1, 95 y NT.

Especial atención requiere la nueva serie de tarjetas PCI DT300, que ofrecen a bajo coste prestaciones difíciles de encontrar en otros fabricantes: A/Ds y D/As de 12 y 16 bits con hasta 333 Mmuestras/sg; ganancia individual para cada canal; capacidad de pre-trigger, post-trigger y about-trigger; etc.

- Para análisis de imágenes científicas o para aplicaciones de visión artificial en la industria, Data Translation ofrece tarjetas digitalizadoras de imágenes específicamente diseñadas en función del tipo de señal de video a digitalizar: CCIR, PAL, digital, Scan-Variable y Line-Scan; junto con software de aplicación para procesado y análisis y librerías para desarrollar aplicaciones a medida en Windows 3.1, 95, NT.

Para más información solicite catálogo o consulte en <http://www.datatranslation.com/>

## **CAPITULO 5**

### **Conclusiones y recomendaciones**

## “USO ALTERNATIVO DE SENSORES PARA LA MEDICION DE VARIABLES SOBRE UN DETERMINADO PROCESO”.

- De acuerdo a lo mencionado en el capítulo anterior se puede concluir que el uso de sensores alternativos es un recurso válido y de gran importancia, ya que esto permite tomar decisiones en circunstancias apremiantes. En cualquier instante puede llegar a fallar algún dispositivo del proceso, en este caso nos interesa aquel en el que llegase a fallar o bien a faltar un sensor por la causa que sea, y, de acuerdo a las ecuaciones de cada sensor es posible monitorear la variable de interés por medio de los cálculos requeridos.
- En la industria química siempre es importante contar con opciones para poder realizar acciones alternativas en el caso en que lleguen a existir emergencias dentro de un proceso cualquiera. Para ello el ingeniero químico debe contar con las herramientas necesarias, pero principalmente con el ingenio y la creatividad para dar soluciones a los problemas que se presentan cotidianamente en la industria.
- Es importante recordar que el principal cometido del ingeniero de procesos es supervisar, corregir y resolver los problemas que se presentan. Para esto siempre debe tener opciones que le permitan realizar sus tareas de una manera eficaz y ágil, aunque también es importante que esto depende en gran medida de su capacidad de reaccionar ante cualquier problema.
- Se debe entender que en la industria química es imprescindible estar siempre en constante desarrollo, innovando y creando nuevas tecnologías para facilitar y optimizar cualquier proceso. Esto como puede advertirse tiene siempre connotaciones económicas de una elevada importancia ya que cualquier mejora en el proceso representará tiempo, costo, etc.

El presente trabajo tiene como finalidad tratar de colaborar de la manera más simple en la optimización del control de procesos por computadora, mediante la alternativa de utilizar otros sensores en un determinado proceso cuando se presente un fallo. Por ello se trató de dar alternativas viables y sencillas para contribuir de la manera más clara y precisa a la constante evolución del control de procesos, que como ya se mencionó es un capítulo de la ingeniería química en constante renovación y desarrollo.

## **CAPITULO 6**

### **Bibliografia**

## BIBLIOGRAFÍA

1. Carr J. Joseph. Sensors and circuits . Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. USA. 1993.
2. Carr J. Joseph. Sensors; Electronic circuit Guidebook. Volume 1. A division of Howard W. Sams & Company, Indianapolis. USA.1997.
3. Carrizales Ramírez Eduardo. Sensores como elementos de medición. México.1997.
4. Crane. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. McGraw-Hill, México.1997.
5. Creus Sole Antonio. Control de procesos industriales. Criterios de implantación. Barcelona: Marcombo, España. 1988.
6. Daily, N. James. Dinámica de los fluidos con aplicaciones en ingeniería. Trillas, México. 1969.
7. Doebelin E. O. Measurement systems: Application and design. 3a. ed.. McGraw-Hill, New York. USA. 1990.
8. Himmelblau. David M. Balances de materia y energía. Prentice-Hall. México. 1988.
9. Holland F. A. Flujo de fluidos para Ingenieros Químicos. Reinhold, New York. USA. 1966.
10. Hostetter Gene H. Sistemas de control. McGraw-Hill. México. 1990.
11. Karlekar. B. V. Transferencia de calor. Interamericana. México. 1985.
12. Knudsen James George. Dinámica de fluidos y transferencia de calor. McGraw-Hill. New York. USA. 1958.
13. Kao Benjamín C. Sistemas de control automático. 7ª. Ed. Traducción de Aranda Pérez Guillermo. Prentice-Hall. México. 1996.
14. Kao Benjamín C. Sistemas de control de procesos. Aplicación, diseño y sintonización. McGraw-Hill. México. 1996.
15. Levenspiel, Octave. Ingeniería de las reacciones químicas. Repla. México. 1987.

16. Ogata Katsuhiko. Ingeniería de control moderno. Prentice-Hall. Englewood Cliffs. New Jersey. USA. 1974.
17. Pallás Areny Ramón. Sensores y acondicionadores de señal. 3ª. Ed. Barcelona: Marcombo. España. 1998.
18. Pallás Areny Ramón. Instrumentación electrónica básica. Barcelona: Marcombo. España. 1997.
19. Pallás Areny Ramón. Transductores y acondicionadores de señal. Barcelona: Marcombo. España. 1989.
20. Pallás Areny Ramón. Sensores e interfaces. Problemas resueltos. Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña, España. 1999.
21. Pérez Conde Concepción. Sensores Ópticos. Valencia. Universidad de Valencia. España. 1996.
22. Reklaitis. G. V. Balances de masa y energía. McGraw-Hill. México. 1989.
23. Retchkiman Grossman Bernardo. Sistemas de control secuencial. IPN, México. 1969.
24. Rohsonow Warron M. Head, Mats and Momentum Transfer. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. USA. 1961
25. Sánchez de León José No y Angulo Usastegui José María. Control de procesos industriales por computador. Paraninfo, Madrid, España. 1987.
26. Sherwood Tomas K. Transferencia de masa. McGraw-Hill. New York, USA. 1975.
27. Smith Carlos A. y Corripio Armando B. Control automático de procesos. Teoría y práctica. Limusa. México. 1995.
28. Svirid Vladimir Andreevich. Sensores refractométricos en fibra óptica. Tesis. UNAM: México. 2001.
29. Sydenham P. H. Handbook of measurement science. Vol. 2. Ed by P.H. Sydenham. Chichester. J. Wiley. 1982.
30. Todd C. D. The potentiometer Handbook. McGraw-Hill. New York. USA. 1975.
31. Tomkins Willis J. Interfacing Sensors to the IBM PC. Prentice-Hall. Englewood Cliffs. New Jersey. USA. 1988.

32. Welty. James R. Transferencia de calor aplicada a la ingeniería. Limusa. México. 1982.