

## **Tercer Ejercicio. Seguridad Nuclear**

### **Tema 3.A.16**

**Instrumentación nuclear. Métodos de medida de presión, temperatura, nivel y caudal utilizados en centrales nucleares.**

**Instrumentación de protección e instrumentación de control.**

#### **INDICE**

- 1. Introducción.
- 11. Instrumentación nuclear.
- 111. Medida de la presión.
- IV. Medida de la temperatura.
- V. Medida del nivel.
- VI. Medida de 1 caudal.
- VI!. Instrumentación de protección e instrumentación de control.
- Bibliografía.

#### **RESUMEN DEL CONTENIDO**

Tras una introducción relativa a conceptos generales, y respecto a la versión antes existente de este tema, se ha añadido el apartado 11, relativo a instrumentación nuclear, en el que se exponen los aspectos fundamentales de ésta y de los tipos de detectores existentes, con énfasis en la medida del flujo neutrónico. Seguidamente se presentan someramente los métodos más habituales para 1a medida de presión, temperatura, nivel y caudal, con figuras intuitivas y lo más simplificadas posibles para facilitar la comprensión (se han eliminado algunos de los métodos descritos en la versión precedente del tema, para compensar la inclusión de la instrumentación nuclear). Se finaliza con un apartado en el que se presenta la diferencia entre lo que es instrumentación de protección y lo que es instrumentación de control, y se aporta una visión de cuáles, de entre los métodos antes expuestos, son los que más se aplican en centrales nucleares.

#### **RELACIÓN CON OTROS TEMAS DEL SUMARIO**

Este tema guarda relación con el 3.A.9, "Sistema de protección del reactor en centrales nucleares", y el 3.A.23, "Sistema de instrumentación y control de centrales nucleares. Utilización de técnicas analógicas y digitales", ambos asimismo del 3er ejercicio, Seguridad Nuclear.

## I. INTRODUCCIÓN

Existe una necesidad permanente de poder medir una gran variedad de magnitudes físicas, tanto en los procesos industriales como en la vida cotidiana, e igualmente en actividades médicas, comerciales, de transporte, militares, ...

En lo que respecta a los reactores nucleares, la instrumentación tiene básicamente una triple misión: la medida, el control, y la seguridad. Ello permite:

a) medir y registrar las magnitudes o variables de importancia para el funcionamiento del reactor.

b) facilitar las operaciones de control del reactor, de modo que éste permanezca en las condiciones más convenientes para el nivel de potencia deseado, bien de modo automático o bien mediante indicaciones y alarmas que faciliten a las acciones de los operadores en tal sentido.

c) proporcionar el nivel de seguridad requerido en todo momento, generando señales de actuación automática de los sistemas de seguridad, ya sea en situaciones transitorias potencialmente peligrosas, ya sea en caso de accidentes.

Este texto comienza haciendo una exposición de la instrumentación nuclear, con una breve mención de los tipos de detectores haciendo énfasis en los detectores de neutrones, por su papel clave en la instrumentación de los reactores nucleares; y seguidamente se hace un resumen de los procedimientos de medida de las cuatro magnitudes o variables (presión, temperatura, nivel, caudal) quizá más significativas. Se exponen los diversos fundamentos de los medidores existentes más comunes, de los que en el apartado VII se mencionan los típicamente existentes en las centrales nucleares.

Como concepto general, al elemento que es sensible a un valor de una variable se le llama sensor; al dispositivo a él habitualmente anexo que permite la conversión del valor de la variable en una señal eléctrica representativa de tal valor, se le llama transmisor.

Para ilustrar dicho aspecto, puede mencionarse el caso de un tubo Bourdon, de medida de presión por expansión del tubo.



1r

Si se le acopla directamente una aguja indicadora, aporta una lectura directa en un indicador, esto es, no precisaría de conversión en señal eléctrica. Ello se usa sobre todo en caso de indicaciones en local, esto es, inmediatamente anexas al lugar de la medida; si se precisase de indicación en un lugar

alejado del proceso (tal como en la sala de control de una central nuclear), se efectúa la citada conversión a señal eléctrica, a fin de facilitar su transmisión.

También puede ocurrir que los sensores vayan ligados a un dispositivo de tipo interruptor; en ellos no existe una conversión de valor físico de la variable en un valor correspondiente en señal eléctrica, sino que lo que ocurre es que avisan de que se ha alcanzado determinado valor, para el cual cierran, o abren según el caso, un circuito dispuesto al efecto. Es el caso, por ejemplo, de un dispositivo de nivel de flotador, tal como

con el que se sabría que se ha alcanzado un nivel preestablecido (nivel de tarado) cuando se cierra un circuito de, p.e., 125 voltios de corriente continua.

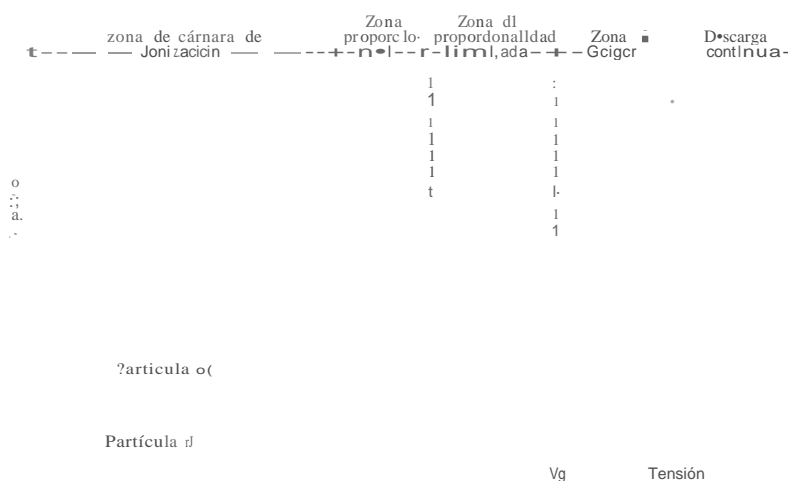
## 11. INSTRUMENTACIÓN NUCLEAR

Existen una serie de instrumentos que permiten detectar, medir y analizar las radiaciones nucleares, esto es, las procedentes de los núcleos atómicos, con una precisión suficiente; permiten mejorar el conocimiento de éstas, prevenir sus efectos biológicos y facilitar su uso seguro, tal como para el caso de su utilización en reactores nucleares. A este respecto, este texto resume los fundamentos de los principales tipos de detectores nucleares.

### 11.1 DETECTORES DE IONIZACIÓN GASEOSA

Son las cámaras de ionización, los contadores proporcionales y los contadores Geiger-Müller, todos ellos constituidos por un recinto lleno de un gas a determinada presión, entre dos electrodos aislados entre sí a los que se les aplica una tensión eléctrica. El gas es un aislante, normalmente no habrá paso de ninguna corriente, pero en presencia de radiación nuclear tiene ionizaciones con lo que el campo eléctrico presente en el detector hará que se pongan en movimiento cargas positivas y negativas hacia los respectivos electrodos de signo contrario, originando en el detector impulsos o corrientes que pueden ser medidos exteriormente. El ánodo suele ser un hilo o barra central, y el cátodo la pared cilíndrica.

La forma de trabajar los detectores de ionización gaseosa varía en función de la tensión eléctrica aplicada. En la figura se representa la variación de la amplitud de los impulsos en función de la tensión aplicada a una cámara cilíndrica. Los rayos gamma producen asimismo ionizaciones, más bajas, su curva no aparece representada en la figura; requieren circuitos amplificadores.



El tramo inicial a la izquierda es la región en que hay recombinación, debido a la baja velocidad de migración de iones, esa zona no se usa para los detectores.

Cuando la tensión es suficiente para que lleguen a los electrodos todos los iones producidos por las partículas nucleares ionizantes, se observa que la amplitud de los impulsos se mantiene constante aunque se eleve apreciablemente dicha tensión. Es la zona conocida como de cámara de ionización.

No obstante, a partir de cierta tensión, empieza a aumentar el tamaño de los impulsos, aunque el número de los iones producidos por las partículas nucleares no haya variado. Ello es debido a que los electrones inicialmente formados adquieren, en su camino a través de la cámara, energía suficiente para ionizar a su vez a otros átomos neutros, con lo que se crea una avalancha de cargas que aumenta la amplitud de los impulsos. Es la zona conocida como de cámara proporcional. Parte de esa zona es de proporcionalidad limitada, debido a que existen algunas no linealidades.

Más allá de la zona de proporcionalidad limitada, los impulsos llegan a hacerse todos de la misma amplitud, independientemente de la ionización primaria causada por la partícula detectada, e independientes del tipo y energía de la radiación. Es la región conocida como de Geiger-Müller.

Un incremento adicional del campo eléctrico lleva a la zona conocida como de descarga continua, en la que el detector se hace inservible.

## 11.2 DETECTORES DE CENTELLEO

Se basan en el hecho de que cuando las partículas nucleares o la radiación X o gamma atraviesan ciertas sustancias luminiscentes, excitan su luminiscencia para dar lugar a pequeños destellos luminosos, que pueden ser recogidos y transformados en impulsos eléctricos.

El material que produce la luminiscencia es llamado cristal de centelleo; los más comunes son el ioduro de sodio activado con talio, el ioduro de cesio activado con talio, el sulfuro de cinc activado con plata, y ciertas sustancias orgánicas, como el antraceno y el estilbeno, en las que la luminiscencia no proviene de una estructura cristalina, sino que es una propiedad de las moléculas.

Los detectores de centelleo no se basan por tanto en la ionización de un gas, y tienen alguna ventaja sobre éstos, pues la alta densidad de un sólido frente a la de un gas da más eficiencia para absorber radiación ionizante, especialmente para rayos gamma.

El cristal de centelleo se monta en contacto con un tubo fotomultiplicador, entre ambos hay una placa (fotocátodo) que recibe la luz y emite electrones que son acelerados por una serie de electrodos montados sucesivamente, que se llaman dinodos. Se obtiene así una señal eléctrica lo suficientemente grande para ser manejada en una cadena electrónica.

## 11.3 DETECTORES DE SEMICONDUCTORES

Los semiconductores son materiales sólidos (Germanio o Silicio) en los que los electrones, en cuanto a diferencia de energía entre la banda de conducción y de valencia, es del orden de 1 electrón-Voltio (eV) en tanto que en los aislantes es de 5 eV. A temperatura ambiente, algunos de los electrones de valencia están en la banda de conducción.

Para controlar la capacidad de conducción de los semiconductores, se le añaden materiales llamados dopantes, de valencia 5 o de valencia 3. Los de valencia 5 generan un excedente de electrones, dan origen a los semiconductores tipo n, en tanto que los de valencia 3 generan un exceso de huecos, se originan los semiconductores tipo p. Poniendo en contacto un

semiconductor tipo p y uno tipo n (unión p-n), la zona inmediata al contacto se neutraliza, debido a que tienen lugar recombinaciones, se la llama zona de deplexión, o de agotamiento.

Si a esa zona se deplexión se le hace incidir una radiación ionizante, se crean pares electrón-hueco; conectando un polo negativo al semiconductor p y un polo positivo al semiconductor n se posibilita la recogida de impulsos de amplitud proporcional a la energía de la radiación.

Los detectores de semiconductores tienen similitud con las cámaras de ionización, en un caso se usa un sólido y en el otro un gas, pero su fundamento tiene semejanzas.

El silicio se usa más que el germanio, pues éste requiere funcionamiento a temperaturas muy bajas.

#### 11.4 DETECTORES DE NEUTRONES

Los neutrones, al no tener carga, no interaccionan directamente con los electrones en la materia. Lo hacen indirectamente, actuando sobre determinados núcleos, lo que hace que de éstos se liberen partículas cargadas.

Los métodos de detección y medida de neutrones (a través de la medida del flujo neutrónico, neutrones/cm<sup>2</sup>.seg) en centrales nucleares, a efectos del control y protección de éstas, utilizan básicamente detectores de ionización gaseosa, de diversos tipos.

a) Contadores proporcionales, que operan en la región proporcional de los detectores de ionización. Habitualmente están llenas de un gas, el trifluoruro de boro ( $\text{BF}_3$ ), y se basan en la reacción  $\text{B}^{10}(\text{n},\alpha)\text{Li}^7$ , esto es, los neutrones actúan sobre los núcleos de boro y generan partículas alfa, que provocan las ionizaciones.

b) Cámaras de ionización compensadas, las cuales, como su nombre indica, operan en la región de cámara de ionización de los detectores de ionización. Utilizan la misma reacción que las anteriores, con electrones revestidos de boro enriquecido en  $\text{B}^{10}$ . Miden a niveles de flujo neutrónico mayores, para los que la presencia de radiación gamma suele interferir, con lo que para descontar la ionización producida por esto, puede instalarse una segunda cámara, sin revestir de boro, que permite tener una referencia para eliminar el efecto de los rayos gamma, o realizarse blindajes con plomo.

c) Cámaras de ionización no compensadas, que asimismo operan en la región de cámara de ionización. Al utilizarse para flujos neutrónicos bastante mayores, el efecto de la radiación gamma deja de ser una perturbación apreciable (la ionización de las partículas alfa producidas por los neutrones es comparativamente mucho mayor), no siendo necesaria la compensación antes mencionada.

d) Cámaras de fisión. Utilizan, en lugar de boro, un material fisiónable, tal como el  $\text{U}^{235}$ , y operan en la región de cámara de ionización o en la proporcional. La ionización es muy acusada, lo que simplifica la electrónica que requieren.

## 111. MEDIDA DE LA PRESIÓN

La medida de la presión es una necesidad habitual en la mayoría de los procesos industriales. Ha de distinguirse entre presión absoluta, que es la presión referida al cero absoluto de presión, y la relativa ("gauge pressure"), que es la diferencia frente a la atmosférica. El otro término común es el de presión diferencial ( $p$ ), o diferencia entre dos valores de presión absoluta.

La medida de la presión diferencial permite determinar el nivel, si se utiliza la relación lineal entre presiones y alturas de columna de fluido; y también el caudal, mediante la raíz cuadrada de la presión diferencial y un factor multiplicativo. Ambas relaciones se recogen en el teorema de Bernoulli.

No es habitual la medida de la presión absoluta; para ello, puede usarse un **tubo en U**, con uno de sus extremos sellado y en el que se haya hecho el vacío en el interior. La presión absoluta se establece en función de los niveles de mercurio en los dos lados del tubo.

$p_{-t} > \dots$

Este tipo de instrumentos suele presentar dificultades, tanto en cuanto a conseguir una lectura precisa de niveles como en cuanto a establecer un vacío total en su interior.

Con respecto a la medida de la presión relativa, y de presiones diferenciales en general, los métodos pueden dividirse en tres grupos:

- a) los de comparación con pesos que actúan sobre áreas conocidas,
- b) los basados en una deformación que es producida por una fuerza (normalmente llamados sensores mecánicos), y
- c) los basados en propiedades eléctricas, bien debido a que una deformación o una fuerza provoca un cambio en tales propiedades (normalmente llamados sensores electromecánicos).

Entre los del primer grupo, cabe mencionar los siguientes:

- El **manómetro de tubo en U**, con los dos extremos abiertos. La presión a medir se aplica a uno de los extremos, estando el otro abierto a la atmósfera, con lo que la presión relativa se obtiene como  $P - P_{atm} = pgh$ .

En cuanto a la medida de la presión diferencial, se comparan dos presiones desconocidas y lo que interesa es el valor de la diferencia entre ambas,  $(P_1 - P_2) = pgh$ ; se podría igualmente usar un manómetro en U.

$h$

Normalmente no es factible convertir la lectura de un manómetro de tubo en U en una señal eléctrica, por lo que este tipo de instrumentos no son adecuados para sistemas con automatismos.

- El **medidor de peso muerto**, que utiliza un pistón sobre el que se colocarían sucesivamente pesos hasta que la presión ejercida por éstos (el área del pistón es conocida) iguale a la presión desconocida que se desea medir.

Dicha igualación se tiene lugar cuando coincide una marca del propio pistón con otra de referencia.

Es un sistema poco práctico, aun cuando tiene una gran precisión, por lo que se utiliza habitualmente como patrón, o referencia, en la calibración de instrumentos de medida de otros tipos.

En cuanto a los de medida del segundo grupo, cabe mencionar los siguientes:

- **Tubo Bourdon**, que consiste en un tubo curvado y flexible, abierto en un extremo que es fijo y en el que se le aplica la presión a medir, y cerrado en el otro, que es libre para moverse.

pf

Los tipos más comunes son los "C" y en espiral. Pueden usarse directamente como manómetros, con un dispositivo que ligue el extremo libre con una aguja indicadora.

Son muy precisos y de lectura repetitiva. Para la medida de presión de un líquido pueden tener problemas si queda aire atrapado en el interior del tubo, pues puede distorsionar las lecturas (para ello, es conveniente la posibilidad de venteo, en los puntos altos).

- **Fuelle**, que consiste en un recinto deformable con forma de acordeón, uno de cuyos extremos está cerrado, y tiene un movimiento longitudinal cuando se le aplica la presión a medir, desde dentro en algunos tipos, desde fuera en otros.

f J ~ - [ }

La posición del fuelle cuando no se le está aplicando queda determinada o bien por la de reposo del propio fuelle, o bien se asegura mediante un muelle, opción ésta que facilita el uso para altas presiones y mejora su linealidad, al tiempo que facilita la calibración, al poderse ajustar el muelle.

Se pueden usar, asimismo, dos fuelles opuestos, en los casos que se desee medir una presión diferencial. Es el caso de los transmisores Barton, considerados en el apartado VI.

- **Diafragma**, basados en un principio similar al del fuelle; están normalmente constituidos por una placa circular, fija en todo su borde exterior, y a cuyos lados respectivos se aplica la presión diferencial a medir. La placa puede ser plana, o corrugada (esto es, con ondulaciones concéntricas), caso éste en que se incrementa el área efectiva permitiendo así mayores deflexiones.

En algunos casos, el diafragma puede adoptar la forma de cápsula abierta (arriba, figura de la derecha), caso éste en el que la similitud con el fuelle se hace mayor.

Tanto para el fuelle como para el diafragma, al igual que en el tubo Bourdon, es factible acoplar un dispositivo que controle directamente el movimiento de una aguja de un indicador. O, asimismo, transformar el desplazamiento en una señal eléctrica que sea la que aporte las lecturas.

En cuanto al tercer grupo, en los que la deformación o fuerza se enlaza con un cambio en variables eléctricas, cabe señalar los siguientes tipos:

- **Medidor de esfuerzo**, también llamado resistivo, que utiliza un material conductor cuya resistencia eléctrica varía en función con el esfuerzo al que le somete la presión que se quiere medir, debido a que tendría lugar un cambio en la longitud y sección del conductor.

Al conductor puede dársele una forma del tipo parrilla, sobre una placa flexible (o un diafragma) a la que se le aplica la presión.

Los cambios en la resistencia eléctrica se detectan con ayuda de un puente de Wheastone, midiendo el voltaje de desequilibrio del puente, que guarda una relación directa con el valor de la presión a medir.

- **Sensor de capacitancia**, que se basa en la medida de la capacitancia entre dos placas metálicas separadas por un dieléctrico (p.e., aire); dicha capacitancia (C) viene determinada por la constante (K) del dieléctrico multiplicada por el área (A) de las placas, dividiendo el resultado entre la distancia (d) entre placas.

+++

Con ello, pueden disponerse de dos placas fijas, y entre ellas colocarse una tercera, normalmente un diafragma de acero inoxidable, que actúa como placa móvil; a las dos capacitancias así obtenidas se las hace formar parte de un circuito electrónico, que transforma la diferencia entre ambas (que guarda relación directa con la presión diferencial aplicada) en una señal eléctrica indicativa del valor de la flp.

Este es el fundamento de los transmisores Rosemount, extensamente utilizados en las centrales nucleares, a los que se alude en el apartado VII.

-**Transformador diferencial**, que típicamente incorpora tres bobinas, una de las cuales aporta la excitación, lo que induce voltajes en las dos bobinas secundarias, montadas en serie/oposición. La presión a medir provoca el desplazamiento de un núcleo intermedio. Cuando el núcleo está en su posición centrada, los voltajes inducidos en las bobinas secundarias son iguales y desfasados 180°, con lo que el voltaje Eo de salida sería cero.

0 ~ - - - - -

t0

En cuanto exista una presión aplicada que provoque que el núcleo se desplace de su posición centrada, se genera un desequilibrio de inductancias, de modo que existiría una señal eléctrica de salida.

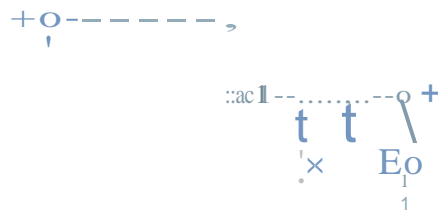
Este tipo de dispositivo requiere una electrónica compleja, si bien su uso está muy extendido.

- **Sensor piezoeléctrico**, que se basa en la conversión de energía mecánica en energía eléctrica, propiedad existente en cristales como el cuarzo, que experimenta una ligera deflexión al aplicarle una presión (mediante un fuelle, o diafragma) y tal deflexión genera un voltaje eléctrico.

1.-----:~";"-.....]

( I

- **Sensor de potenciómetro**, que habitualmente consiste en que, sobre una resistencia de longitud determinada ( $L$ ) a la que se le aplica un voltaje fijo ( $E_1$ ), se desplaza una escobilla en una magnitud directamente relacionada con la presión a medir.



A partir del voltaje de salida ( $E_0$ ), se infiere el valor de la posición de la escobilla ( $x$ ), y a partir de ella, la presión.

- **Dispositivo de cable resonante**, que consiste básicamente en un cable tenso, albergado en una cámara que contiene la presión a medir, en presencia de un campo magnético.

El cable resuena a su frecuencia natural de acuerdo a la tensión aplicada, y tal frecuencia varía en función de la presión. Por ello, la presión se calcula midiendo la citada frecuencia de vibración del cable.

## IV. MEDIDA DE LA TEMPERATURA

La medida de la temperatura es asimismo muy importante en los procesos industriales, normalmente no debe sobrepasar cierto valor a fin de que la operación sea segura y fiable.

Los métodos más habituales son los basados en uno de los siguientes principios: la expansión térmica; el efecto termoeléctrico; y los cambios de la resistencia eléctrica.

Los métodos de expansión térmica hacen uso de que las dimensiones de las sustancias, ya sean sólidas, líquidas o gaseosas, cambian con la temperatura. A este respecto, pueden mencionarse:

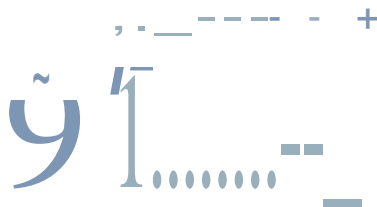
- **Termómetro con líquido dentro de vidrio**, que usan mercurio o alcohol coloreado, contenido en el interior de un bulbo del que parte un tubo capilar. Al subir la temperatura, el fluido se expande en el interior del capilar, y la lectura es visual (estos termómetros son los usados en aplicaciones médicas); la curvatura del líquido, en su extremo, limita la precisión de la lectura, si bien pueden conseguirse altas precisiones en aplicaciones industriales, en la que los rangos de medida pueden llegar a ser muy grandes.

- **Termómetro bimetalico**, que se basan en disponer dos tiras, rígidamente unidas, de metales diferentes, y los cambios de temperatura hacen que se doble en una forma que viene determinada por los cambios de longitud de cada metal.

Son habituales los termómetros bimetalicos con configuración en espiral

en los que se mide el desplazamiento del extremo libre a medida que cambia la temperatura.

- **Termostatos de barra**, que se usan en algunas centrales nucleares para vigilar el calentamiento ambiental, y detectar así pequeñas roturas.



Están constituidos por una barrita metálica que en caso de alta temperatura ambiental dilata, y a determinado valor de ésta produce el cambio de estado de contactos que controlan un circuito eléctrico; en el esquema representado sería una apertura del circuito de vigilancia de temperaturas.

- **Termómetros de presión**, o termómetros llenos, en los que la variación de la temperatura, al producir una dilatación del fluido que llena el tubo, se

traduce en un aumento de la presión. Tal aumento de la presión puede medirse con ayuda de un tubo Bourdon, por ejemplo.

El bulbo se localiza dentro de la zona cuya temperatura se desea medir, en tanto que el tubo Bourdon estaría situado a una cierta distancia.

- Los instrumentos basados en el efecto termoeléctrico son los llamados **termopares**. Se basan en el efecto Seebeck, según el cual cuando dos metales diferentes puestos en contacto se calientan, se genera un voltaje en su unión caliente, esto es, en la insertada en el fluido cuya temperatura se desea medir (la inserción se hace con ayuda de una funda metálica rígida),

y el voltaje se mide en la llamada unión fría, o de referencia.

La fórmula es del tipo  $V = a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + \dots$ , que es problemática de manejar por la presencia de las potencias, pero existen parejas de materiales, que son los que se utilizan, en los que los coeficientes de los términos con potencia son prácticamente nulos, con lo que les aplica la fórmula lineal, esto es,  $V = a_1T$ . Con ello, las curvas características serían líneas rectas, de diferente pendiente en función de los metales en contacto; en el eje de abscisas irían las temperaturas, de 0° hasta valores superiores a los 1000°C, en tanto que en ordenada estarían milivoltios, que irían de 0 a unos 50 mV.

Los más conocidos son los de tipo K, hechos de Cromel (Ni/Cr) en contacto con Alumel (Ni/Mn/Al/Si), o los de tipo E, de Cromel y Constatán (Cu/Ni); los primeros trabajan en el rango de 0° a 900°C, en tanto que los segundos lo hacen en el de 0° a 1250°C.

La medida precisa de la temperatura requeriría que en la unión fría existiesen 0°C, lo cual presenta dificultades, normalmente es problemático mantener una temperatura estable a tal valor; lo que se hace es mantener un valor más manejable (p.e., 80°C) y corregir la lectura de los mV obtenidos en

tales condiciones sumándole los mV que le corresponden por la diferencia entre los citados 80° y 0°.

Constituyen el método más utilizado para medir temperaturas en la industria.

- Los de cambio de resistencia eléctrica más importantes son las termorresistencias, habitualmente conocidas como RTDs ("Resistance Temperature Detectors"), basados en que la resistencia de los metales al paso de una corriente eléctrica crece con la temperatura, siguiendo una ley del tipo

$$R = R_0 (1 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + \dots)$$

que igualmente como ocurre para el voltaje en los termopares, no es práctica de manejar salvo en los casos de linealidad, esto es, cuando

lo que ocurre para algunos metales, en rangos de temperatura determinados. Así, el platino mantiene una buena linealidad hasta los 1000°C; los llamados Pt100 son aquellas RTDs de platino en las que el valor de la resistencia es de 100 Ω a 0°C. A veces, dado que el platino es un material caro, pueden usarse otros metales, como el Cu, el Ni o el W.

La medida de la temperatura se hace insertando la RTD, que va en una funda que la alberga conjuntamente con material aislante, en el fluido cuya temperatura se desea medir; ello se hace mediante una inserción directa, que requiere una instalación permanente, pues los cables de la RTD habrían de atravesar la pared de la tubería o tanque; o bien utilizando pocetes ("thermowells"), pequeños recintos en forma de dedo que entran verticalmente a la tubería o tanque, y en los que va introducida la RTD, lo que facilita que puedan ser retiradas con facilidad, en caso de mantenimiento o avería.

Por la RTD se hace circular una corriente de intensidad conocida, por lo que si se mide el voltaje se deduce inmediatamente el valor de la resistencia, que se habrá modificado en función de la temperatura, de lo que se deduce el valor de ésta.

Normalmente, sin embargo, lo que se hace es que de la RTD insertada en el fluido se llevan cables hasta el dispositivo de medida, un puente de Wheatstone en el cual se mide el grado de desequilibrio con un voltímetro, que da una señal proporcional a la variación de la resistencia, y por tanto de la temperatura.

Las RTDs se usan, al igual que los termopares, extensamente en las centrales nucleares. Tienen una inercia térmica mayor que los termopares, esto es, son de mayor tiempo de respuesta ante variaciones rápidas de temperatura, lo cual suele ser aceptable puesto que la temperatura es una variable que no cambia tan rápidamente como puede hacerlo, por ejemplo, la presión.

Las RTDs, en comparación con los termopares, tienen una mayor precisión, y se comportan mejor frente al ruido, o pequeñas fluctuaciones en la señal (al ser ésta comparativamente mayor que la de los termopares); en tanto que los termopares tienen ventajas en cuanto a comportamiento frente a

vibraciones y altas temperaturas, y se usan preferentemente para medir temperaturas de aire o de gases.

- Otra variante de los de cambio de resistencia eléctrica son los **termistores**, que utilizan materiales semiconductores, para los que la variación de la resistencia con la temperatura es del tipo

$$R = R_0 \cdot \exp \left( - \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right)$$

por lo que la resistencia disminuye al aumentar la temperatura. La aproximación de linealidad sólo puede usarse en pequeños rangos de temperatura. Pero son muy precisos, en bajas temperaturas. Se suelen usar en torres meteorológicas.

- Los **termómetros de radiación** se basan en que los cuerpos, a una temperatura T dada, emiten energía siguiendo la ley

$$E = kT^4$$

y tienen la ventaja de que no precisan ponerse en contacto con el cuerpo radiante, lo que es importante en los casos de temperatura muy alta.

Destacan los pirómetros ópticos, en los que la radiación incide sobre un filamento de tungsteno, el cual forma parte de un circuito en el que es posible variar la corriente eléctrica

Lo que se hace es aumentar la corriente hasta que, mirando desde el otro lado, el filamento aparentemente desaparece, lo que ocurre cuando se hacen iguales los colores del filamento y del cuerpo radiante; la temperatura del cuerpo radiante se obtiene en función de la corriente que, en tales condiciones, atraviesa el filamento.

## V. MEDIDA DEL NIVEL

Existe una gran variedad de instrumentos disponibles para medir el nivel de líquidos; en muchas ocasiones no se precisa una medida de alta precisión, basta con una indicación aproximada, pero aun en esos casos es importante asegurar que el nivel se mantiene por encima de la tubería de vaciado, para evitar problemas en la aspiración de las bombas, y es igualmente importante vigilar el nivel superior, pues si no, podría haber un rebose hacia el exterior; y, en tanques con un fluido en ebullición, ha de evitarse que el nivel del líquido llene la tubería de salida del vapor.

Entre los métodos de medida, se destacan los siguientes:

- **Varillas de inmersión**, que constituyen el método más sencillo y barato, y consisten en una pequeña barra metálica en la que se ha grabado una escala o unas marcas, que se inserta en el tanque que contiene el líquido. Requiere retirarlo para ver hasta dónde se ha mojado, el método es adecuado para tanques poco profundos.

Se utilizan normalmente para medir el nivel de tanques de fuel o de gasolina.

- **De flotador**, situado sobre la superficie libre del líquido, y del cual se mide su posición, para lo que puede usarse un potenciómetro

o una cinta con un contrapeso para mantenerla tensa

o magnéticos, a base de dos imanes, uno con forma de corona circular que flota sobre la superficie del líquido, y el otro va dentro de un tubo guía y se desplaza siguiendo al flotador

en los que la posición del imán interior es la que se transmite hacia un indicador.

- En los de **boya**, también llamados de desplazamiento, no hay flotación, la densidad del elemento sensor es superior a la del fluido, y se basan en la utilización del principio de Arquímedes; la boya estará parcialmente sumergida, y existen sistemas que permiten medir la variación de su peso, que se corresponde con el volumen desalojado, y por tanto, con el nivel. Una posibilidad es tener una palanca que provoque la torsión de una barra que está unida rígidamente a la pared del tanque.

Ello permite, con ayuda de un dispositivo electrónico, transformar dicha torsión, que es proporcional al nivel, en una señal eléctrica de medida del nivel.

- **De vasos comunicantes**, que permiten observar, con ayuda de un tubo o manguera transparente, hasta dónde llega el nivel en ésta, que coincidirá con el del tanque cuyo nivel se desea medir.

Suelen utilizarse para mediciones ocasionales, esto es, conectándoles solamente durante el tiempo durante el cual se precisa realizar la medida.

/En la figura, y en las que siguen, a efectos de simplificar no se han representado las tuberías de entrada y salida de los tanques/.

- **De medida de presión diferencial**, que en un tanque abierto (o que cuente con una tubería de venteo) permiten conocer el nivel  $h$  como resultado de dividir el valor de la presión aportada por el líquido entre el producto de la densidad y la constante  $g$ . No influye el valor de la presión atmosférica, pues al usarse un medidor de presión diferencial, ésta actúa en ambos lados del medidor, compensándose su efecto.

-----

Un sistema análogo sería posible para tanques cerrados (lo cual se ha representado a la derecha), el que en el tanque podría existir una presión

determinada, distinta de la atmosférica, pero no influiría al actuar igualmente sobre ambos lados del medidor.

De mucha utilización en centrales nucleares es la medición de nivel de tanques en que existen condiciones de saturación, esto es, cuando coexisten las fases líquida y vapor. Se usa, en tales casos, una columna de referencia que se mantiene siempre llena, y la diferencia de presiones (aportadas por las alturas de agua) entre esta columna, que es fija, y la del agua del tanque permite inferir el nivel en éste.

o

Para asegurar el llenado continuo de la columna, o rama, de referencia se dispone de un pote de condensado que, al estar más frío que el tanque, hace que el vapor que llega hasta él se condense de forma continua, con lo que lo mantiene lleno, y el exceso de condensado retorna hacia el tanque dado que la tubería de conexión tiene una ligera pendiente hacia éste.

En casos de sumideros (que al estar excavados en el suelo no disponen de paredes externas como los tanques), o cuando se trate de tanques que pudieran estar completamente vacíos, se puede usar un fuelle como elemento sensor

Cuando el sumidero se va llenando de líquido, la presión debida al nivel de fluido se transmite verticalmente con ayuda de un capilar de silicona, hasta un transmisor que la convierte en señal eléctrica.

- Otro método es a base de **burbujeo**, en el que se inyecta un gas en el que se va variando la presión, y cuando empiezan a salir burbujas es que se han igualado la presión del gas y la correspondiente a la altura de agua existente, lo que permite determinar ésta.

Suele usarse para volúmenes amplios y abiertos, como los embalses.

- Uno de los métodos de fundamento eléctrico es el de **dispositivos capacitivos**, que se suelen usar en aplicaciones a procesos complejos por su carácter extremo; se basan en disponer de dos cilindros concéntricos, que se sumergen en el líquido cuyo nivel se desea medir, y el líquido se comporta como un dieléctrico, por lo que midiendo la capacitancia  $C$  se infiere el nivel  $h$ , fórmula en la que intervienen características geométricas y los valores de la permitividad  $\epsilon$  del líquido y del aire o gas de la superficie libre sobre el líquido.



En caso de que el líquido sea conductor, los cilindros habrán de encapsularse en un material aislante, y la fórmula que relaciona  $h$  y  $C$  habrá de modificarse para tener en cuenta el efecto dieléctrico del citado aislante.

- Otros métodos eléctricos usan **resistencias calentadas**, en las cuales la disipación de calor es mucho mejor en líquidos que en gas o vapor; ello se traduce en una variación del valor de la resistencia, que permite inferir si la resistencia está sumergida o no. Por ello, puede usarse un conjunto de resistencias, cada una a una altura diferente, lo que aporta una indicación discreta (nivel cubre / nivel no cubre)



o bien disponer de una resistencia de elevada longitud, dispuesta verticalmente, cuyo valor varía en forma continua, en función de dónde esté el nivel.

- Otra variante de estos métodos eléctricos es el de la **conductividad** que igualmente puede utilizar diversos sensores o sondas, a diferentes alturas (p.e., una de nivel bajo, otra de nivel alto y otra de alarma de nivel muy alto);



y a cada sonda va asociado un circuito que, cuando el nivel cubre su sonda, se cierra (al ser conductor el líquido y las paredes del tanque, y haberse éste conectado a tierra), y ello aporta señal indicativa de que el nivel está, cuando menos, justo hasta encima de la sonda. Esto es, tendremos una indicación discreta, o sea, no continua.

Este método se suele usar para medir el nivel de pozos, y también en tanques con fluidos radiactivos.

- **Dispositivos ultrasónicos**, en los que la energía procedente de un emisor ultrasónico (o de otro tipo de onda), situado sobre el líquido, se refleja en la superficie libre del líquido retornando a un receptor.

La medida del tiempo de tránsito permite inferir hasta dónde alcanza el nivel del líquido.

## VI. MEDIDA DEL CAUDAL

La medida de caudal es asimismo extremadamente importante en múltiples procesos industriales. En muchos casos está relacionada con la facturación, por lo que es importante determinar con precisión las cantidades de fluido aportadas.

Normalmente, lo que se mide es el caudal volumétrico. En algunos casos es precisa la medición del caudal másico, aspecto éste menos frecuente, y que se trata al final de este apartado.

Los medidores de caudal volumétrico más comunes, de uso muy extendido al ser robustos y no tener partes móviles, son los medidores de presión diferencial, que se basan en colocar un dispositivo en el interior de la tubería que crea una presión diferencial ( $i1p$ ) entre ambos lados del mismo; esta  $i1p$  es suficiente para poder ser medida adecuadamente, y con ello puede determinarse el caudal volumétrico, pues es proporcional a la raíz cuadrada de dicha  $i1p$ .

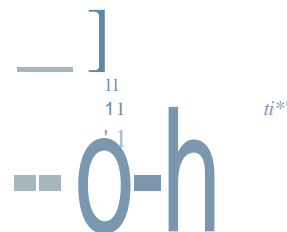
Podría medirse tal presión diferencial a base de medir dos presiones, usando un instrumento aguas arriba y otro aguas debajo de la restricción, pero ello tiene el inconveniente de que las diferencias de presión que se establecen son bajas, la imprecisión de las medidas individuales no permitiría apreciar bien el valor de su diferencia, y habrá de usarse un único instrumento (tal como un diafragma, un fuelle, o una célula capacitiva, ya aludidos al tratar la medición de presión).

A partir de la presión diferencial a medir, con ayuda de un transmisor se genera una señal eléctrica que se envía a unos circuitos extractores de raíz cuadrada, y, con ello, se determina el valor del caudal volumétrico de la tubería.

A efectos simplificativos, en la mayoría de las figuras que se incluyen en el texto se ha representado un manómetro de mercurio de tubo en U, en lugar de los habituales instrumentos tipo transmisor ya aludidos.

Los medidores de caudal volumétrico por presión diferencial, en función del elemento utilizado para crearla, son los siguientes:

- **Placa de orificios**, que está constituida por un disco metálico con un agujero central; es el método de medida más extendido, quizá un 50% del total de los instrumentos de medida industriales sean de este tipo.



Su precisión, sin embargo, no es muy alta; pueden presentar problemas cuando los bordes se van degradando, reduciendo el diámetro del orificio.

- **Tobera**, de mejor precisión y menor degradación que las placas de orificios, si bien requieren mayor esfuerzo de ingeniería para su diseño y construcción.

---IP

Se suelen usar para la medida de caudal de vapor.

- **Venturi**, que es un instrumento de precisión que acentúa el trabajo ingenieril requerido para su diseño y fabricación.



Normalmente se comportan muy bien a largo plazo, aunque en ocasiones podrían acumular ensuciamiento, que si llega a generar una disminución en el área de paso produciría un aumento de la presión diferencial, que el instrumento interpreta como una subida de caudal, sin que éste realmente se haya modificado.

- **Tubo Pitot**, que se dispone en una posición opuesta al sentido del fluido, con lo que una parte de éste se introduce en el tubo hasta detenerse, perdiendo su energía cinética, lo que genera un aumento de la presión dentro del tubo, y ello se utiliza como referencia de alta presión para la medición del caudal (presión diferencial); la referencia de baja presión se toma de la pared de la tubería.

Una variante del tubo Pitot son los llamados **Annubar**, cuyo fundamento es el de un conjunto de tubos de Pitot cuyas mediciones se promedian para tener así un muestreo de presiones en diferentes puntos de la sección de la tubería; normalmente consisten en un único tubo, dispuesto según el diámetro de la tubería con varias perforaciones que permitan el mezclado de fluido a diversas alturas, con lo que se genera un efecto promedio.

-----.

h

Como referencia de baja presión se coloca un segundo tubo, con un solo agujero opuesto al sentido del fluido, que aporta el valor de la presión estática.

Los Annubar se suelen usar en tuberías de gran sección, y a veces en casos de caudales de aire en los que las presiones diferenciales son muy bajas.

- **Codos**, que deben su nombre a que se montan en codos de tuberías (cambios de 90° en la dirección), y que se basan en utilizar el principio de que la fuerza centrífuga experimentada por el fluido en el codo hace que la presión en el lado externo sea mayor que en el interno.

Su precisión es baja, se suelen usar en casos en que, a la vista de las características de la instalación (con bombas que mantienen siempre la misma velocidad), basta con una indicación de este tipo al mantenerse el caudal normalmente constante; también se usan codos para vigilar la posible ocurrencia de grandes roturas, que se detectarían por un aumento muy importante del caudal, para lo que no se requiere una precisión significativa.

De otros tipos, cabe mencionar los siguientes:

- Medidor de área variable, o **rotámetro**, que permite graduar una apertura, en función del caudal; su forma más sencilla es a base de un tubo transparente de sección cónica, que tiene inmerso un flotador



y en función de la altura a que se estabilice, queda determinado el valor del caudal. Dadas sus características, no se usan para control automático, se basan en una lectura visual.

- **Electromagnéticos**, que se basan en aplicar la Ley de Faraday, que relaciona el voltaje que se induce en un conductor, cuando se mueve en un campo magnético determinado, con la velocidad de tal movimiento. Por ello, en caso de fluidos suficientemente conductores y con la tubería adecuadamente aislada, y tras establecer polos magnéticos a un lado y otro de la tubería, se mide la corriente inducida en el fluido, con ayuda de unos electrodos insertados en lados opuestos de la tubería.

$$1 - \frac{1}{2} \frac{v}{c} \approx 0.5 - \frac{1}{2} \frac{v}{c}$$

Dado que no representan obstrucción alguna al movimiento del fluido, se suelen usar para líquidos sucios o viscosos; otra ventaja es que pueden medir caudal en las dos direcciones. Requieren un valor umbral de conductividad eléctrica, por lo que pueden usarse para fluidos acuosos, pero no para los de naturaleza orgánica.

- **Medidores ultrasónicos**, que así mismo constituyen un método no invasivo, esto es, que no requiere instalación interna a la tubería. Tienen aplicación creciente en centrales nucleares, en los casos en que es especialmente conveniente disponer de una medida de gran precisión. Son de dos tipos:

a) de tiempo de tránsito, basados en enviar un pulso ultrasónico a favor y en contra del fluido,

y la diferencia de tiempo en realizar ambos recorridos es función de la velocidad del fluido.

b) Doppler, basados en medir la variación de frecuencia que experimenta un ultrasonido según se desplace en el sentido del caudal o en el contrario; la velocidad del fluido es una función directa de la disminución del valor de la frecuencia del ultrasonido.

$$- \frac{1}{2} \frac{v}{c} \approx 0.5 - \frac{1}{2} \frac{v}{c}$$

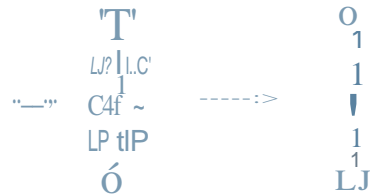
Para que exista señal reflejada, se precisa que el fluido tenga partículas en suspensión, u otro tipo de discontinuidades.

- **Vórtex**, basados en la generación de remolinos por medio de un obstáculo no aerodinámico, y la frecuencia de aparición de tales remolinos es proporcional a la velocidad del fluido;

$$f_v = \frac{v}{D}$$

los remolinos provocan fluctuaciones de la presión, detectables con los medidores adecuados, tal como mediante técnicas de ultrasonidos.

- Crossflow, en el que se obtiene de un perfil, en un instante dado (es como una foto) de los remolinos existentes en una sección dada, y detectar cuándo dicho perfil se observa en otra sección aguas abajo, todo ello con técnicas de ultrasonidos.



El método se basa, por tanto, en que los remolinos se trasladan sin apenas variación en el tramo elegido, con lo que dividiendo la distancia entre dos conjuntos emisor/detector y el tiempo que tarda el perfil seleccionado en presentarse aguas abajo, se obtiene el valor de la velocidad del fluido.

En cuanto a los medidores de caudal másico, el más intuitivo es el llamado medidor másico, basado en aportar calor en un punto determinado del fluido, con un calentador



y en disponer de dos sensores de temperatura, uno aguas arriba y otro aguas abajo. Si no hubiese caudal, ambos marcarían la misma temperatura; en tanto que a medida que éste crece, el sensor localizado aguas arriba se enfría (no le llega el calor del calentador), en tanto que el segundo se calienta, pues el fluido calentado se desplaza hacia él; la diferencia de temperatura que se crea entre ambos es una función lineal del caudal siendo éste másico dado que el calentamiento depende de la masa de fluido existente.

- En determinados casos, en las centrales nucleares han de conocerse caudales másicos. Se usan, para ello, medidores volumétricos complementados con la determinación del valor de la densidad ( $M = \rho V$ ). En los casos de caudal de agua puede utilizarse, como aproximación, un valor constante para la densidad, e incorporarlo en un circuito multiplicativo sobre el valor del caudal volumétrico; pero si se necesita una mayor precisión, lo que se hace es medir la temperatura, y ésta está relacionada directamente con la densidad.

Cuando se trata de vapor saturado, el problema se resuelve a base de medir la presión, y de ella se obtiene la temperatura (a partir de las tablas de vapor, que relacionan presión y temperatura cuando existe saturación); y de ésta, como en el caso anterior, se infiere el valor de la densidad.



## VII. INSTRUMENTACIÓN DE PROTECCIÓN E INSTRUMENTACIÓN DE CONTROL

Los sistemas de instrumentación de centrales nucleares incluyen la medida de una serie de variables (de las que se han destacado las de presión, temperatura, nivel y caudal), normalmente con conversión de la magnitud de la variable a señal eléctrica, típicamente en el rango de 4-20 mA de e.e., que acceden a cabinas en las que la señal pasa a estar en el rango de 0-1 OV; en tales cabinas se las procesa para su utilización en una serie de funciones.

En las centrales nucleares tales cuatro variables juegan un papel primordial, complementadas por el flujo neutrónico y la radiación, y en menor importancia otras como concentración, posición, fuerza, par,....siendo asimismo significativas otras de naturaleza eléctrica (tensión, frecuencia).

Ya se ha mencionado, respecto del flujo neutrónico, que para medirlo se hace de forma indirecta, por la radiación que produce; el nivel de flujo neutrónico existente en un reactor está correlacionado con el valor de la potencia producida. En las centrales nucleares hay un muy amplio margen de potencia a vigilar por los detectores neutrónicos, que en sentido creciente se le divide en intervalo de fuente, intervalo intermedio e intervalo de potencia; los detectores proporcionales se usan normalmente para el intervalo de fuente, en tanto que para el intervalo intermedio se usan cámaras de ionización compensada y para el intervalo de potencia cámaras de ionización no compensada. Las cámaras de fisión son muy versátiles, pueden usarse para todos los intervalos.

La medida de la radiación, en lo que está desligado de la medición del flujo neutrónico, corresponde a la especialidad de protección radiológica, y no a la de seguridad nuclear. Típicamente, y para la medida de efluentes de los procesos, se utilizan tanto detectores de ionización gaseosa como de centelleo y de semiconductores.

Volviendo a la medida de la medida de la presión, nivel y caudal, se utilizan transmisores, que en función del suministrador, difieren en el principio físico utilizado. De entre los transmisores habitualmente utilizados, en este texto se resumen dos tipos, los de los fabricantes Rosemount y Barton.

Los Rosemount son medidores de capacitancia, con una célula sensora llena de aceite de silicona, limitada por dos placas que forman la concavidad; las presiones inciden sobre diafragmas externos, corrugados, y en función de su valor relativo así se desplaza, ligeramente, un diafragma central

La diferencia de capacitancias ( $C_1$ ,  $C_2$ ) entre cada placa fija y la central se convierte en una señal eléctrica, en el rango de 4 a 20 mA de corriente continua.

Los Barton se basan en otro principio, pues utilizan un doble fuelle con un eje central que se desplaza en función de los valores relativos de las presiones a uno y otro lado.

Dicho punto central va unido a una tira metálica en la que habrán instalado dos sensores de esfuerzo (galgas extensométricas), que tienen la propiedad de que su resistencia eléctrica varía con el esfuerzo; al doblarse la tira por efecto de la presión diferencial, uno de los sensores se extenderá en tanto que el otro se contraerá, y de las variaciones relativas en la resistencia eléctrica se infiere el valor de la presión diferencial.

La medida de presión utiliza básicamente una línea de pequeño diámetro (llamada normalmente "tubing", o línea de proceso, o línea de instrumentos), que conecta la tubería o tanque cuya presión se desea medir con el transmisor, en tanto que la medida de nivel se hace llevando hasta el transmisor dos de tales líneas, puesto que lo que se mide es una presión diferencial; en cuanto a caudal, se hace lo mismo (el caudal varía con la raíz cuadrada de la  $\Delta p$ ), pero en este caso, además de las dos líneas, hace falta un elemento que crea la  $\Delta p$ , tal como un codo (utilizado cuando se requiere poca precisión, tal como para detectar grandes roturas), en tanto que para medidas más precisas, tales como las que se realizan para determinar, con ayuda de la temperatura, la potencia térmica de la central, se utilizan otros medios tales como Venturis y toberas, y también métodos no basados en determinar el caudal por presión diferencial, tales como ultrasónicos, Crossflow, ... ya aludidos.

En cuanto a la temperatura, en centrales nucleares se usan básicamente RTDs y termopares, en tanto que para vigilancia de temperaturas de áreas recorridas por tuberías, para detectar pequeñas roturas, se suelen emplear termostatos.

La señal eléctrica que, procedente del transmisor, es representativa del valor de la variable física, se puede utilizar en operaciones matemáticas, retardarla, incrementarla, ... Una parte de la instrumentación es la que ejerce funciones de **protección**, en la que las señales van a los dispositivos conocidos como biestables, los cuales cambian digitalmente el estado de su salida (pasan de "0" a "1") si la variable excede un valor determinado, llamado valor de tarado, o de disparo.

Tanto la medida como la transmisión de la señal y su tratamiento en biestables suele estar triplicada, o cuadruplicada, se habla por ello de que existen canales redundantes. En ellos ha de darse una determinada coincidencia, por ejemplo, "2-de-3", esto es, para que haya actuación la variable ha de exceder su valor de tarado al menos en dos de los tres biestables en los que finalizan los canales analógicos.

La instrumentación así estructurada se utiliza para funciones de protección, destacando al respecto el Sistema de Protección del Reactor, que agrupa las funciones de disparo (parada automática) de reactor y de actuación de otros

sistemas de emergencia (Inyección de agua de refrigeración, aislamientos,...), que implican la previsión de una serie de actuaciones automáticas; estas funciones están apoyadas por un conjunto de indicadores y registradores que posibilitan decidir acerca de la realización de actuaciones manuales de seguridad.

Además de las funciones de protección, la instrumentación incluye las funciones de control, que incluye el propio control y, típicamente, las funciones de indicación, registro y alarma; el control busca mantener a las variables dentro de determinados rangos de variación, durante la operación normal de la central. A tal efecto los reactores cuentan con estaciones controladoras que permiten, para una variable dada y para devolver a ésta a su valor deseado en cada momento, optar por la acción manual del operador o bien por la actuación automática.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Instrumentación Nuclear. Agustín Tanarro Sanz. Servicio de publicaciones de la J.E.N. (hoy, CIEMAT).
2. "Principies of Measurement and Instrumentation", Alan S. Morris, Prentice Hall, 1988.
3. Detección y medida de la radiación. Fascículos 111.1.a, 111.1.b, 111.1.c, 111.2, 111.5.c. Instituto de Estudios Nucleares, J.E.N.
4. "Long Term Performance and Aging Characteristics of Nuclear Plant Pressure Transmitters", NUREG/CR-5851, AMSC for USNRC, 1993.
5. "DOE Fundamentals Handbook. Instrumentation and control" (DOE HDBK-1013), volume 1. DOE (Department of Energy, USA).
6. "2.1 Temperature Measurement", "2.2 Flow Measurement", "2.3 Pressure Measurement", "2.4 Level Measurement", McMaster.
7. "Tecnología del Control", Carlos Bordons Alba, Opto. Ingeniería de Sistemas y Automática.
8. "Level measurement", Detlef Brumbi, Krohne Messtechnik GmbH.
9. "Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado", Luis García Gutiérrez, C.E.M., Tres Cantos (Madrid).
10. "Medidor de desplazamiento positivo", Smith Meter Inc., MN01011 S.
11. "Cost effective methods for remote testing of performance of critical equipment in Nuclear Power Plants", Training Course, AMSC.
12. "Instrumentos de medida, transmisores y elementos de visualización", Curso de fundamentos físicos y tecnológicos de centrales nucleares, TECNATOM S.A.
13. "Control de procesos industriales", Antonio Creus Solé, Productica.
14. "Manual de instrumentación aplicada", Considine & Ross, CECSA.