XXXVI.- CONTROL MEDIOAMBIENTAL

APARATOS

pfernandezdiez.es

Situación de las tomas de muestras	*1367*
Medidas del lado de humos	*1372*
Consumo de reactivo	*1375*
Pureza del yeso	*1376*
Otros métodos de ensayo	*1376*
Medidas de presión y temperatura	*1376*
Aparatos de medida de la presión	*1378*
Aparatos de medida de la temperatura	*1379*
Pirometría óptica	*1380*
Pirometría de radiación	*1380*
Propiedades eléctricas	*1381*
Termómetro de resistencia eléctrica	*1381*
Termopares	*1381*
Circuitos múltiples	*1382*
Selección de materiales	*1382*
Termopar encamisado	*1383*
Hilos conductores en termopares	*1384*
Unión caliente	*1384*
Medida de la temperatura de fluidos en tuberías	*1385*
Medida de la temperatura de los tubos	*1386*
Tubos de paredes de hogar	*1386*
Propiedades acústicas	*1388*
Medida del flujo térmico	*1389*
Detección de incrustaciones	*1389*
Aplicación a sobrecalentadores y recalentadores	*1390*
Medida de la temperatura de los humos	*1390*
Termopar de alta velocidad	*1391*
Medida de la temperatura del aislamiento y envolventes	*1393*
Superficies aislantes externas	*1393*
Envolventes de acero	*1394*
Medida del título y pureza del vapor	*1395*
Obtención de la muestra de vapor	*1395*
Método trazador de Na	*1396*
Método de conductividad eléctrica para determinar la pureza del vapor en generadores de vapor	*1397*
Calorímetro de laminación	*1398*
Análisis gravimétrico	*1400*
Medida de caudales: ventajas e inconvenientes de cada tipo de medidor elemental	*1400*
Referencias	*1405*

XXXVI.1.- SITUACIÓN DE LAS TOMAS DE MUESTRAS

Los ensayos de características funcionales en los sistemas de control medioambiental, se llevan a cabo para determinar si las unidades están operando adecuadamente.

Un sistema de control medioambiental puede incluir:

- *Quemadores de bajo NO_x*
- *Módulos de depuradores de FGD por vía húmeda*
- *Un equipo de procesado de yeso*
- *Un precipitador electrostático*
- *Un sistema de reducción selectiva catalítica del NO_x (SCR)*

Los parámetros que se deben medir para determinar las características funcionales de un sistema como el precedente, son:

- *Caída de presión en el sistema*
- *Eficiencia en la eliminación de partículas*
- *Opacidad de humos en chimenea*
- *Concentración de la emisión de NO_x*
- *Eficiencia de la eliminación de SO_2*
- *Requisitos del agua de aporte*
- *Consumo de reactivo*
- *Pureza del yeso*
- *Arrastre del eliminador de vahos*
- *Consumo de energía eléctrica*

Para el control medioambiental de las características operativas (ECS) de un sistema, lo normal es realizar dos ensayos. El primero se hace nada más terminar su instalación, y el segundo al año de estar operativo. Antes de que el sistema de control medioambiental (ECS) esté construido hay que seleccionar la ubicación de las tomas de muestras.

En la Fig XXXVI.4 se indican algunos compromisos asumidos para la toma de diversas muestras; la entrada al sistema está situada en el extremo izquierdo y consiste en un tramo de conducto de humos, seguido por un codo hacia un tramo ascendente. La salida del precipitador es la entrada al ventilador de tiro inducido; se indican los *orificios* de ensayo ubicados en el tramo de conducto posterior a la torre del absorbedor y en la chimenea; se han seleccionado para facilitar el mejor perfil del flujo en cada ubicación, dentro de las limitaciones de la instalación.

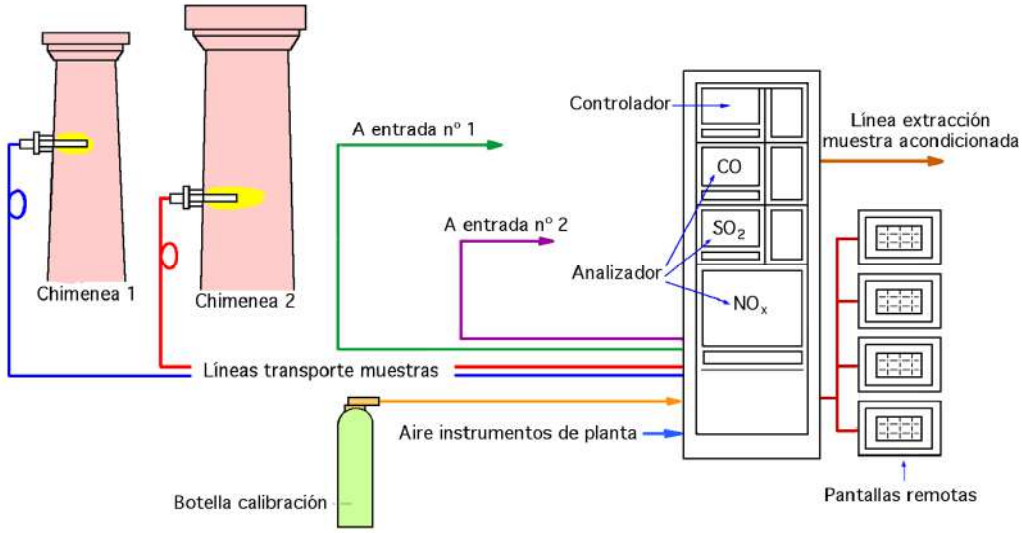

Fig XXXVI.1.- Sistema extractor chimenea entrada tipo CEM

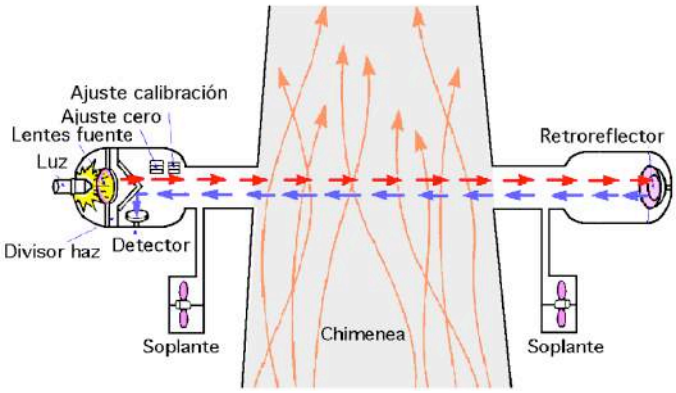

Fig XXXVI.2.- Sistema medidor transmisor

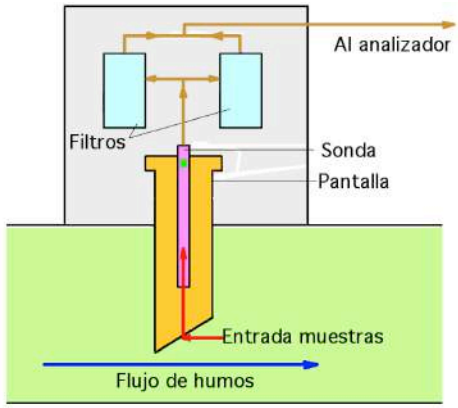

Fig XXXVI.3.- Sonda extractiva de muestras

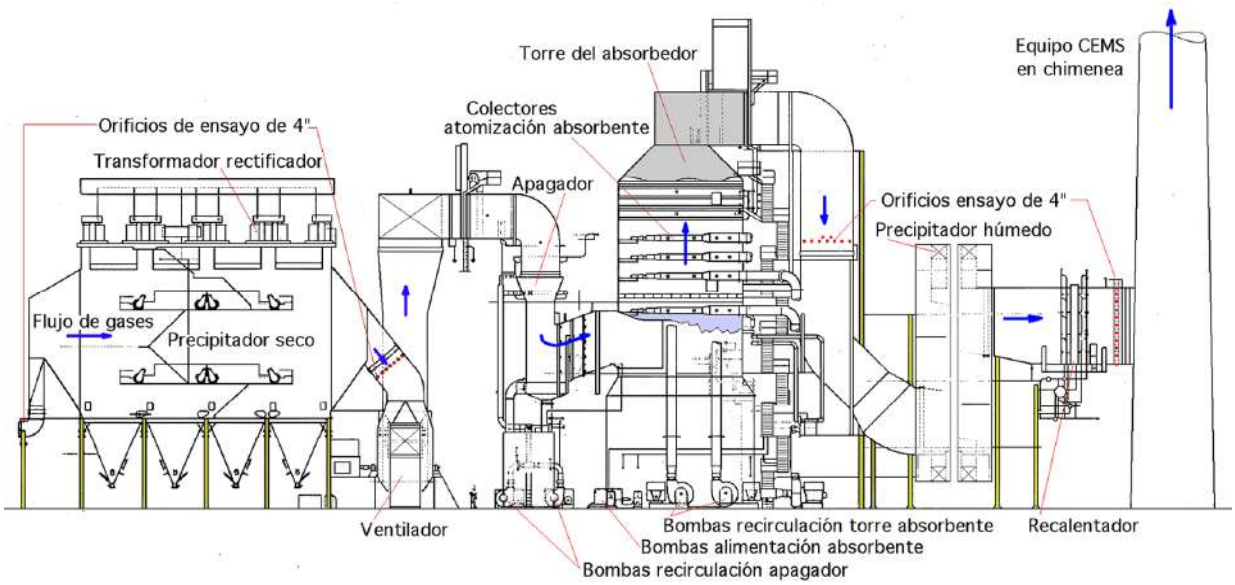

Fig XXXVI.4.- Ubicación de orificios de ensayo

El número y ubicación de los orificios para sondas móviles se seleccionan de conformidad con el Método 1 de la Agencia de protección Medioambiental (EPA) de USA.

Tabla XXXVI.1.- Dispositivos ordinarios de medida de nivel del líquido para sistemas de control medioambiental

Tipo sensor	*Teoría operación*	*Aplicación sistema control medioambiental*	*Indicaciones*
Presión diferencial	*Mide presión estática diferencial con tomas de presión en las paredes del recipiente*	*Nivel tanque lechada técnica utilizada en sistemas hidráulicos*	*Sí hay contacto sensor/líquido Se usan dos tipos: bridas y juntas flexibles.*
Ultrasónico	*Emite pulsos a superficie líquido El retraso del pulso reflejado se convierte en nivel líquido*	*Tanques abiertos para todo fluido o lechada.*	*No hay contacto sensor/líquido Problemas por ondas, polvo, vapor Ruido fondo filtrable.*
Capacidad eléctrica	*Detecta nivel por capacidad entre sonda y pared tanque*	*Alarmas alto/bajo nivel Sonda de capacidad detecta superficie líquido*	*Problemas por incrustaciones y deposiciones*
Flotador	*Un flotador sube/baja con nivel El flotador se inserta en tanque*	*Tanques agua limpia Producto bien molido*	*Hay flotador magnético, no recomendable aplicación incrustante*
Radio frecuencia	*Detecta señal eléctrica reflejada en sensor y en líquido*	*Nivel líquidos y sólidos*	*Tecnología novedosa prometedora Campo eléctrico > conductores*
Óptico	*Detecta cambios en intensidad de luz*	*Nivel en espesadores*	*Para nivel lechada. Mide intensidad luz a distancia de líquido*

Tabla XXXVI.2.- Tecnologías de monitorización continua de emisiones CEM

Tecnología	*Características operativas*
Radiación infrarroja (IR)	*Un haz infrarrojo pasa a través del filtro de medida y se absorbe por el gas componente. Un detector de luz crea una señal para el monitor*
Absorción ultravioleta (UV)	*Un haz dividido con filtro óptico, fototubo y amplificador mide la diferencia de absorción del haz entre referencia y muestra*
Luminiscencia química	*Se inyecta ozono en la muestra y reacciona con NO_x generando luz que se mide en fotocélula*
Detección ionización llama	*Los hidrocarburos se ionizan con una potente luz Las señales se reciben en un detector de ionización de llama*
Transmisómetro	*La luz atraviesa la chimenea y se refleja en un espejo opuesto La cantidad de luz retornada es proporcional al número de "partículas + aerosoles" presentes en los humos*
Celdas electroquímicas	*Voltaje medido con muestra de O_2 inyectada en solución con base fuerte; se compara con voltaje de referencia*
Cromatografía	*Se pasa la muestra de gas por columna para ajuste y calibrado. Se compara la salida con la medida por detector de fotometría o conductividad térmica*

Tabla XXXVI.3.- Monitorización continua de emisiones CEM

Componente	*Tecnología CEM*
Partículas (opacidad)	*Transmisómetro, absorción radiación beta*
Dióxido de azufre, SO_2	*Absorción UV, radiación IR, fluorescencia*
Oxidos de nitrógeno, NO_x	*Luminiscencia química, espectroscopia UV, radiación IR*
Cloruro de hidrógeno HCl	*Radiación con filtro gas*
Monóxido de carbono CO	*Radiación*
Dióxido de carbono, CO_2	*Radiación*
Oxígeno, O_2	*Celda electroquímica*
Compuestos orgánicos volátiles (VOC)	*Detección ionización llama*
Otros tóxicos orgánicos/aire	*Cromatografía*
Amoníaco, NH_3	*Como para NOx*

Tabla XXXVI.4.- Análisis de calidad de la cal

Parámetro	*Método sugerido*	*Frecuencia sugerida*	*Uso de datos*
Tasa desmenuzamiento	*ASME Método C-110-76a*	*Análisis doble para cada cal*	*Valor subida temperatura, reactividad y calidad*
Impurezas	*Disolución ácida*	*Análisis doble para cada cal*	*Alto nivel impureza indica peor calidad*
Pérdida peso en ignición	*Gravimétrico*	*Análisis doble para cada cal*	*Pérdida peso / calidad Vía CO_3Ca y $Ca(OH)_2$*
Índice cal disponible	*Ensayo rápido sacarosa*	*Análisis doble para cada cal*	*Calidad cal*
Calcio, Magnesio	*Absorción atómica Cromatografía iónica Acido etileno-diamina tetracético*	*Análisis doble para cada cal Necesidad chequeo calidad reactivo*	*Análisis requerido en procesos con subproducto utilizable, o con cal alta en Mg*
Contenido sólidos lechada cal, % en peso	*Gravimétrico*	*Diaria*	*Chequeo calibración medidor densidad y datos del desmenuzador*

Tabla XXXVI.5.- Análisis de calidad de la caliza

Parámetro	*Método*	*Frecuencia sugerida*	*Uso de datos*
Reactividad	*pH y tamaño partículas*	*Análisis doble de caliza*	*Comparar para aceptabilidad*
Grindabilidad (Índice Bond)	*Ensayo molino laboratorio*	*Análisis doble de caliza*	*Limitada por especificación sistema molino húmedo*
Tamaño caliza	*Método criba*	*Análisis doble de caliza Monitorizar mes*	*Limitada por especificación sistema molino húmedo*
Inertes	*Disolución ácida*	*Análisis doble de caliza Monitorizar semana sistemas yeso*	*Indicador (calidad / yeso)*
Carbonato	*Evolución CO_2 Evolución $Ba(OH)_2$ Valoración alcalinidad*	*Análisis doble de caliza Monitorizar semana sistemas yeso*	*Calidad reactivo*
Calcio y magnesio	*Absorción atómica Infrarrojos Acido etileno-diamina tetracético*	*Análisis doble de caliza Monitorizar semana sistemas yeso*	*Chequear calidad*
Sólidos en lechada caliza % en peso	*Gravimétrico*	*Diario*	*Chequear densidad, problemas circuito molino*
Tamaño partícula lechada caliza, % en peso	*Desmenuzado húmedo*	*Diario*	*Problemas molino, o baja carga o pobre yeso*

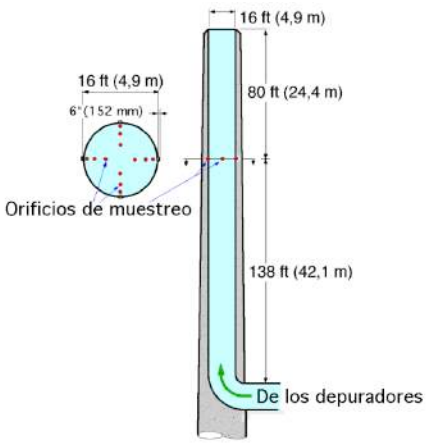

Fig XXXVI.5.- Posición en la chimenea de las tomas de muestras según el Método 1 de EPA

Una aplicación del Método 1 se indica en la Fig XXXVI.5.

- La distancia aguas abajo de una perturbación del flujo, que en este caso es la entrada a la chimenea, es de 138 ft (42,1 m), es mayor de 8 diámetros de chimenea, 138 / 16 = 8,6

- La distancia vertical ascendente, hasta la salida de la chimenea es de 80 ft, lo que implica en total 5 diámetros, 80 / 16 = 5

- Según el Método 1, serían 12 los puntos de toma de muestra requeridos

- Si el conducto de humos es de sección rectangular, el Método 1 se aplica determinando el diámetro equivalente $d_{equiv} = \frac{2\,a\,b}{a+b}$,

siendo a y b los lados del rectángulo

La sección transversal se divide en áreas rectangulares iguales y la muestra se toma en el centro de cada una de ellas.

Tabla XXXVI.6.- Análisis, recirculación y purga de la lechada

Parámetro	*Método sugerido*	*Frecuencia sugerida*	*Uso de datos*
pH	*Calibración/2 muestras patrón o con muestras al azar*	*Una vez /turno al azar Diario muestra patrón*	*Investigación pH y eficiencia proceso*
Sólidos suspendidos en lechada	*Gravimétrico*	*Semanal*	*Calibrar densímetro y eficiencia proceso*
1° Ca^{++} y Mg^{++} 2° K^{k} y Na^{+}	*Absorción atómica Cromatografía iónica Métodos químicos*	*Diario para Ca^{++} y Mg^{++} en sistemas/calcio*	*Cálculo estequiometría y monitorizar proceso*
1° $SO_3^{=}$ $CO_2^{=}$, $SO_4^{=}$, Cl^{-} 2° F^{-} , NO_3^{-}	*Cromatografía iónica Métodos químicos*	*Diario para 1° $SO_3^{=}$ $CO_2^{=}$, $SO_4^{=}$, Cl^{-}*	*Cálculo estequiometría, medida cloruros, monitorizar proceso y producir yeso*
Metales disueltos Fe, Mn, Al, etc.	*Absorción atómica*	*No frecuentemente*	*Investigar proceso*
Aditivos: ácidos adípico y dibásico, formatos, tiosulfatos, inhibidores, etc	*Cromatografía iónica Métodos químicos*	*Diario*	*Determinar y corregir dosificación*
Total sólidos disueltos	*Gravimétrico*	*Semanal*	*Calibrar densímetro para sólidos suspendidos*
Alcalinidad disuelta	*Valoración ácido-base*	*Semanal*	*Pérdida de álcalis en torta de filtro*
Ensayos de decantación	*Cilindro graduado*	*Semanal*	*Característica espesador e investigar proceso*
Ensayo filtro escamas	*Filtrar y pesar*	*En puesta en servicio*	*Propiedades torta filtro*
Distribución tamaño	*Contador excéntrico*	*En puesta en servicio*	*Carac. deshidratación*

XXXVI.2.- MEDIDAS DEL LADO DE HUMOS

Para realizar un ensayo de características funcionales con un *sistema de control medioambiental (*ECS*)*, se emplea un procedimiento que combina los Métodos 5 *y* 8 de la *Agencia de Protección Medioambiental* (EPA), con el fin de medir simultáneamente los niveles de partículas, SO_2, SO_3 y SO_4 H_2. Los datos obtenidos a partir de la sonda móvil incluyen la velocidad de los gases, obtenida con un tubo Pitot, y los niveles de CO_2, O_2, humedad, SO_2, partículas y SO_3 ó SO_4H_2 en chimenea.

a) Fracción de humedad de los humos:

$$W = \frac{1{,}34\ P_{asp}}{1{,}34\ P_{asp} + 500\ \frac{V_{m\ seco}\ P_{medidor}}{T_{medidor}}} = \left(\frac{lb\ mol_{agua}}{lb\ mol_{gas\ húmedo}}\right)$$

en la que: $\begin{cases} P_{asp} = \text{ganancia peso aspiradores} \\ V_{m\ seco} = \text{volumen muestra gas seco en condiciones medidor, } ft^3 \\ P_{medidor} = \text{presión en medidor, in.Hg} \\ T_{medidor} = \text{temperatura medidor, } °R \end{cases}$

b) Peso molecular gases base seca: $M_{gas\ seco} = 1{,}01\ (44\ CO_{2seco} + 32\ O_{2seco} + 29\ N_{2seco})\ \dfrac{lb}{lb\ mol}$

c) Peso molecular gases base húmeda:

$M_{gas\ húmedo} = M_{gas\ seco}\ (1 - W) + 18\ W$, con $W =$ Humedad específica en $\dfrac{lb\text{-}mol\ H_2O}{lb\text{-}mol\ gas_{húmedo}}$

d) Humedad del gas: $w = \dfrac{18\ W}{M_{gas\ seco}\ (1 - W)}\ \dfrac{lb_{H_2O}}{lb_{gas}}$

e) Velocidad gas chimenea:

$v_{humos} = 85{,}45\ F \sqrt{\dfrac{T_m\ \Delta p_{dif}}{p_{abs}\ M_{gas\ húmedo}}}\ \dfrac{ft}{seg}$, con $\begin{cases} v_{humos} = \text{velocidad humos, } ft/s \\ \Delta p_{dif} = \text{presión diferencial media medida por el Pitot, } "H_2O \\ T_m = \text{temperatura media del gas en el conducto, } °R \\ p_{abs} = \text{presión absoluta en el conducto, } "Hg \\ M_{gas\ húmedo} = \text{peso molecular gas, } lb/lb\ mol \\ F = \text{factor de corrección del Pitot, del orden de 0,84} \end{cases}$

f) Caudal volumétrico real:

$Q_{vol.real\ humos} = 60\ v_{humos}\ A$, con A = área sección transversal del conducto, ft^2

g) Flujo volumétrico seco en condiciones normales:

$Q_{vol.\ seco} = \dfrac{528\ Q_{vol.real\ humos}\ p_{abs}\ (1 - W)}{29{,}92\ T_m}$, con $\begin{cases} 528 = \text{temperatura estandar, } °R \\ 29{,}92 = \text{presión estándar, } "Hg \end{cases}$

h) Total partículas y SO_4H_2 *- granos/ACF*

$C_n = \dfrac{0{,}2723\ (1 - W)\ p_m\ M_{comp}}{V_{gas\ seco}\ T_m}$, con $\begin{cases} C_n = \text{concentración componente en condiciones conducto} \\ M_{comp} = \text{masa componente colectado, mg} \\ V_{gas\ seco} = \text{volumen muestra gas seco} \end{cases}$

i) Total partículas y SO_4H_2 *- granos/ACF*

$C_s = \dfrac{0{,}01542\ M_{comp}}{V_{gas\ seco}}$, con C_s = concentración específica de gases de combustión, granos/ACF ,

j) Total partículas SO_4H_2, NO_x y SO_2 - lb/h

$$C_m\,(\frac{lb}{h}) = 8{,}568.10^{-3} C_s\ Q_{vol.\ seco}\ ,\ con\ C_m = caudal\ másico\ componente\ gas$$

k) Emisión partículas total SO_4H_2, NO_x y SO_2

$$E_{seca} = \frac{0{,}348\ C_m\ F_{seco}}{Q_{vol\ seco}\ (20{,}9 - \%O_{2\ en\ gas\ seco})}\ ,\ con \begin{cases} E_{seca} = emisión\ seca\ con\ 0\%\ O_2\ ,\ lb/10^6\ Btu \\ F_{seco} = factor\ F\ seco\ con\ 0\%\ O_2 \\ 20{,}9 = O_2\ en\ aire,\ con\ 0\%\ O_2 en\ gas,\ \% \end{cases}$$

en la que el factor F_{seco} es la relación entre el volumen teórico de los gases secos con 0% de exceso de O_2, obtenido en la combustión completa de una cantidad conocida de combustible, y su poder calorífico superior; los datos se obtienen en un análisis elemental del combustible, y el factor F_{seco} se calcula en la forma:

$$F_{seco} = \frac{(3{,}64\ H) + (1{,}53\ C) + (0{,}57\ S) + (0{,}14\ N) - (0{,}46\ O)}{P_{cal.\ superior}}\ 10^6$$

siendo: H, C, S, N, O, el hidrógeno, carbono, azufre, nitrógeno y oxígeno del combustible, en % en peso

El factor F_{seco} es constante para cada combustible, ± 3%; valores promedios se indican en la Tabla siguiente:

Combustible	*DSCF/10⁶ Btu*
Carbón bituminoso	*9820*
Aceite	*9220*
Gas	*8740*
Cortezas de madera	*9640*
Virutas de madera	*9280*

l) Partículas por millón (ppm) SO_2 en húmedo:

$$C_{ppm\ SO_2 húm} = \frac{8{,}48.10^2 V_{agua} C_{SO_2}\ (1 - W)}{V_{muestra\ gas\ seco}}\ ,\ con \begin{cases} C_{ppm\ SO_2\ húm} = concentración\ SO_2\ en\ gas\ húmedo \\ V_{agua} = volumen\ total\ agua\ en\ solución\ del\ aspirador \\ W = \frac{humedad\ gas,\ lb\text{-}mol_{agua}}{lb\text{-}mol_{gas\ húmedo}} \\ C_{SO_2} = concentración\ SO_2\ en\ solución\ del\ aspirador,\ mg/l \\ V_{muestra\ gas\ seco} = volumen\ muestra\ gas\ seco \end{cases}$$

m) Partículas por millón (ppm) de SO_2 en seco:

$$C_{ppm\ SO_2\ seco} = \frac{20{,}9\ C_{ppm\ SO_2\ húmedo}}{(1 - W)\ (20{,}9 - \%O_{2en\ gas\ seco})}\ ,\ con \begin{cases} C_{ppm\ SO_2\ seco} = concentración\ SO_2\ en\ gas\ seco,\ con\ 0\%\ O_2 \\ C_{ppm\ SO_2\ húmedo} = concentración\ SO_2\ en\ gas\ húmedo \\ 20{,}9 = O_2\ en\ aire,\ con\ 0\%\ O_2\ en\ gas \end{cases}$$

n) Partículas por millón (ppm) de NO_x en seco y en húmedo: *El NO_x se evalúa directamente mediante los sistemas de monitorización, en ppm sobre base seca.*

o) Eficiencia recolección-eliminación total de partículas, SO_4H_2 y SO_2:

$$Ef = \frac{C_{ent} - C_{sal}}{C_{ent}}\ 100\,,\ \text{con}\ \begin{cases} E_f = \text{eficiencia recolección-eliminación, \%} \\ C_{ent} = \text{concentración producto entrada, } lb/10^6\ Btu \\ C_{sal} = \text{concentración producto salida, } lb/10^6\ Btu \end{cases}$$

p) Porcentaje isocinético: $I = \dfrac{v_{gas\ en\ tobera}}{v_{gas\ en\ conducto}}\ 100$

$v_{gas\ en\ conducto}$ = *velocidad media gas muestra en conducto, ft/s*

$$v_{gas\ en\ tobera} = \frac{V_{gas\ seco}\ T_{gas\ conducto}\ p_{medidor}}{60\ t\ A_{toberas}\ T_{gas\ medidor}\ p_{conducto}\ (1 - W)}\ ft/s$$

$v_{gas\ seco}$ = *volumen gas seco muestra, en condiciones reales, ft^3*

t = *tiempo toma muestra, min*

$A_{toberas}$ = *área sección transversal toberas, ft^2*

$T_{gas\ conducto}$ = *temperatura gas conducto, °R*

$T_{gas\ medidor}$ = *temperatura media gas en medidor, °R*

$p_{medidor}$ = *presión absoluta en medidor, "Hg*

$p_{gas\ conducto}$ = *presión absoluta en conducto, "Hg*

Consumo de reactivo.- Existen dos procedimientos para medir el consumo de reactivo:

- Uno mide directamente el caudal másico de reactivo sólido (para los sistemas cal/caliza), utilizando un alimentador gravimétrico de cinta verificado; este método es engorroso, porque se tienen que medir también los volúmenes inicial y final del tanque de almacenamiento y las respectivas densidades, cada 24 horas.

- El otro se basa en el análisis químico; el consumo de reactivo se calcula a partir de la relación estequiométrica, del análisis de caliza y las medidas del lado de gas, mediante la ecuación:

$$\text{Consumo caliza} = \frac{100\ SR\ SO_2}{64\ CaCO_3}\ lb/h\,,\ \text{con:}\ \begin{cases} SR = \text{relación estequiométrica (ver Tabla XXXV.1)} \\ SO_2 = SO_2\ \text{eliminado, } lb/h \\ 64 = \text{peso molecular de } SO_2\,,\ lb/lb.mol \\ 100 = \text{peso molecular de } CO_2Ca,\ lb/lb.mol \\ CO_3Ca = CO_3Ca \text{ disponible en caliza } (lb_{CO_3Ca}/lb_{caliza}) \end{cases}$$

El consumo de reactivo se ajusta por la $\begin{cases} - \text{ desviación del } SO_2 \text{ eliminado} \\ - \text{ concentración} \end{cases}$ respecto de las condiciones de diseño.

Tabla XXXVI.7.- Análisis de los sistemas de deshidratación

Parámetro	*Método sugerido*	*Frecuencia sugerida*	*Uso de datos*
% sólidos/fango espesador o hidrociclón	*Gravimétrico*	*Diario*	*Investigación proceso calibración densímetro*
Agua clarificada análisis agua	*Ver Tabla XXXVI.6*	*Semanal*	*Monitorizar espesador*
% sólidos filtrados sobrenadando	*Gravimétrico*	*Diario*	*Monitorizar estado filtro*

Pureza del yeso.- Una muestra de yeso tomada durante el ensayo, se analiza tal como se describe en la Tabla XXXVI.8a.b.

Se necesitan ajustes por contaminación con $\begin{cases} \text{- ceniza volante} \\ \text{- concentración de cloruros} \\ \text{- presencia de materiales inertes} \end{cases}$ si los niveles de entrada al sistema de *desulfuración de humos (*FGD*)* se desvían notablemente de los de diseño.

Tabla XXXVI.8.- Análisis de la calidad del yeso

Parámetro	*Método sugerido*	*Frecuencia sugerida*	*Uso de datos del producto*
Ca^{++} , Mg^{++} , Na^{+} , K^{+}	*Absorción atómica*	*Semanal*	*Pureza y propiedades*
Fe_2O_3 , SiO_2 Cl^{-} , $SO_4^{=}$	*Cromatografía iónica*	*Diario*	*Pureza y propiedades*
$SO_3^{=}$, $Ca\,SO_3\,(½)\,H_2O$	*Yodimetría*	*Diario*	*Pureza y propiedades*
Contenido humedad	*Gravimétrico*	*Diario*	*Importa yeso vendible Monitorizar deshidratado*
Área superficial	*Análisis BET (partículas retenidas)*	*En puesta en servicio o en cambio de proceso*	*Condensado y absorbido corresponde a área*
Agua combinada	*Caldeo 482°F (250°C)*	*Semanal*	*Pureza yeso*
Tamaño medio partículas	*Contador reja sedigrafía + tamices*	*En puesta en servicio o en cambio de proceso*	*Pureza y propiedades producto*
Relación de aspecto	*Escaneado con microscopio electrón.*	*En puesta en servicio o en cambio de proceso*	*Pureza y propiedades producto*
Sales solubles en agua	$\sum(Na^{+} + K^{+} + Mg^{++})$	*Según necesidad*	N_2 *, pureza y propiedades* N_2 *, producto*
Polvo (ceniza volante)	*Insoluble en ácido*	*Diario*	*Insolubles +* SiO_2 *+ otros*
pH	*Electrodo*	*Diario*	*Pureza y propiedades producto*

Otros métodos de ensayo.- De entre los numerosos métodos existentes para la medida de los parámetros relativos al *sistema de contaminación ambiental (*ECS*)*, se pueden destacar:

- El SO_2 *se puede medir con un sistema de monitorización continua de emisiones (CEMS)*

- El nivel de partículas se mide por el método EPA 5 ó 17, o bien por métodos alternativos como el de la sonda de las Fig XXXVI.5 y 6

XXXVI.3.- MEDIDAS DE LA PRESIÓN Y TEMPERATURA

Las medidas de la presión y temperatura, proporcionan datos sobre las características funcionales del proceso, consumo energéticoy requisitos de diseño y operatividad.

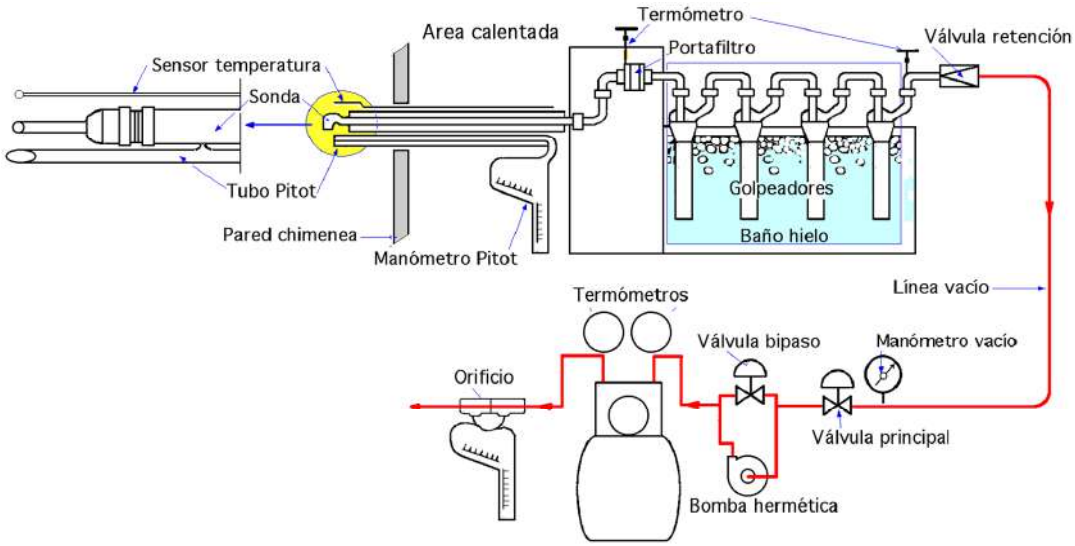

Fig XXXVI.5.- Tren de muestras para emisiones de SO_2 y de partículas para EPA, método 5

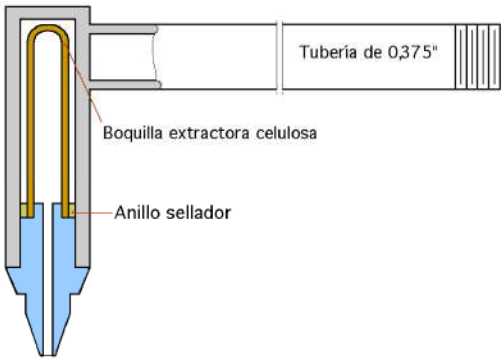

Fig XXXVI.6.- Sonda isocinética para toma de muestras de polvo

Hay que tener en cuenta que:

- Las lechadas tienden a ser muy erosivas y corrosivas

- La presencia de sólidos en los flujos de líquidos y gases puede atorar los instrumentos de medida; para asegurar la operación a largo plazo se tienen que incluir sistemas de purgado

- La monitorización de las temperaturas es importante para:

- La protección contra las heladas

- La prevención de { *- la cristalización*; *- gradientes térmicos (espesadores y clasificadores)*; *- la corrosión (precipitadores, filtros de sacos, sistemas FGD y conductos)*

- El control de los procesos

Los { *- revestimientos de elastómeros*; *- componentes de fibra de vidrio o plásticos* } se tienen que proteger de las altas temperaturas.

Las chimeneas que no cuentan con revestimiento se deben proteger de las bajas temperaturas.

APARATOS DE MEDIDA DE LA PRESIÓN.- Los instrumentos de medida de presión son de diversas formas, dependiendo de la magnitud, precisión de la presión y de la aplicación en concreto.

Los manómetros son idóneos para la medida de $\begin{cases} \text{- presiones} \\ \text{- diferencias de presión} \end{cases}$

Los fluidos utilizados van: $\begin{cases} \text{- desde los más ligeros que el agua, para presiones bajas} \\ \text{- hasta los pesados como el mercurio para presiones relativamente altas} \end{cases}$

La Fig XXXVI.7 muestra un manómetro Bourdon universal de tubo oval, que tiene uno de sus extremos cerrado y dispuesto según un perfil semicircular, que se endereza cuando se le apl.ca una presión; el movimiento del extremo cerrado se utiliza como índice sobre una escala.

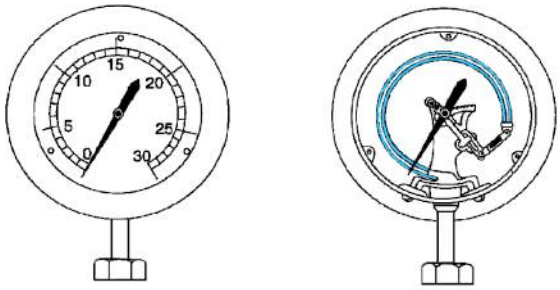

Fig XXXVI.7.- Manómetro Bourdon

Existen manómetros Bourdon para un amplio intervalo de presiones estáticas, con diversos grados de precisión y exactitud:

- Para el ensayo hidrostático de las partes a presión y del rendimiento de la caldera, se requiere una gran precisión

- Para determinar con exactitud las entalpías de los estados del agua y del vapor, se requieren medidas de presión y temperatura muy precisas

Para medir la presión con alta precisión, en lugar de manómetros de tubo Bourdon se prefieren los de carga estática, o los transmisores de presión calibrados.

Para medir presiones diferenciales pequeñas cuando la presión total no exceda de 1 psig (6,9 kPa) se utilizan manómetros de diafragma.

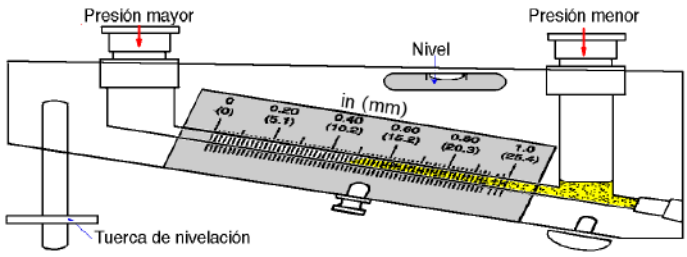

Fig XXXVI.8.- Manómetro inclinado, para medir presiones diferenciales bajas a presiones estáticas pequeñas

Para intervalos amplios de presiones diferenciales y elevadas presiones estáticas se utilizan manómetros de fuelles opuestos, que son adecuados para medir presiones diferenciales en los circuitos del generador de vapor, del orden de $\begin{cases} 2 \div 100\ psi \\ 0{,}14 \div 6{,}9\ bar \end{cases}$ con presiones estáticas hasta 6000 psi (413,7 bar).

- Existen aparatos de medida de presión que transmiten neuróticamente la señal de salida a un sistema de control

- Otros diseños más modernos utilizan circuitos eléctricos que producen y transmiten la señal eléctrica a la salida, enviándola a un ordenador; estos convertidores presentan restricciones, debido a las limitaciones de temperatura de los componentes eléctricos

- Los transductores emplean cristales piezoeléctricos, cuya resistencia eléctrica se modifica cuando el mismo se deforma por la presión

- Otros diseños de transmisores de presión usan un diafragma acoplado a una resistencia eléctrica (extensímetro) o electro-elongómetro; una mínima deformación en el diafragma se transmite al extensímetro que modifica su resistencia, indicando la presión.

- Aplicaciones más avanzadas utilizan fibra óptica embutida en un diafragma metálico, relacionando la variación del haz luminoso que atraviesa la fibra óptica, con la presión.

Ubicación de las conexiones de presión.- Los criterios para ubicar una conexión para medir la presión son siempre los mismos, independientemente del valor de la presión, del tipo de aparato de medida y del fluido cuya presión se desea comprobar.

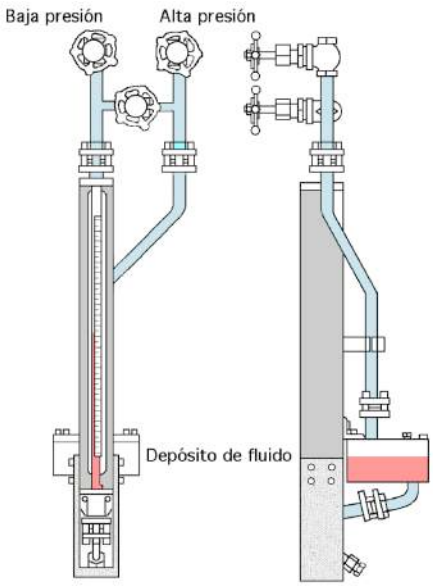

Fig XXXVI.9.- Manómetro de Hg para alta presión

Las tomas de presión en tuberías se sitúan de modo que eviten impactos o remolinos del fluido, asegurando una medida exacta de la presión estática correspondiente.

A veces, una conexión de presión a través de una pared puede no ser muy representativa, debido a las condiciones del flujo de fluido; en este caso se utiliza una sonda puntiaguda, con la que se minimiza el efecto de la película laminar de fluido próxima a la pared, y así disponer de una medida que sea representativa de la presión estática del fluido.

Las líneas que unen las tomas de presión con los instrumentos deben ser lo más cortas posible y carecer de fugas.

Hay que vigilar la:
- *ubicación del instrumento*
- *acumulación de* { *residuos* / *gases no condensables* } *en cualquier parte de la instalación*
- *posibilidad de condensación en las líneas de conexión entre toma e instrumento*

APARATOS DE MEDIDA DE LA TEMPERATURA.- Utilizan propiedades de las sustancias como la dilatación térmica, la radiación y algunas magnitudes eléctricas.

La precisión es diferente según sea $\begin{cases} \textit{- la propiedad que se utiliza para la medida} \\ \textit{- la sustancia que se emplea} \\ \textit{- el diseño del instrumento} \end{cases}$

Pirometría óptica.- Compara el brillo visible de un objeto con el de una fuente referencial de radiación que es un filamento de tungsteno calentado eléctricamente. El instrumento mide la temperatura de superficies con emisividad del orden de la unidad, y cuando se calibra adecuadamente da excelentes resultados por encima de 1500ºF (816ºC). Sirve para medir la temperatura de la superficie interna de un recinto calentado uniformemente.

Cuando se usa para medir la temperatura de un objeto exterior a un hogar, siempre lee de menos:

- Para cuerpos de alta emisividad (lingotes de acero) el error es pequeño, del orden de 20°F (11°C)

- Para superficies líquidas no oxidadas de hierro o acero, el error es grande, del orden de $\begin{cases} 200 \div 300°F \\ 111 \div 167°C \end{cases}$

No sirve para medir la temperatura de gases limpios ya que éstos no emiten radiación en el espectro visible.

Pirometría de radiación.- El instrumento absorbe toda la energía correspondiente a la radiación del cuerpo caliente, independientemente de la longitud de onda. La absorción de calor eleva la temperatura de un termopar que lleva el instrumento, que se calibra para indicar la temperatura del cuerpo caliente que está visando el pirómetro, siempre en el supuesto de que la emisividad de la superficie sea la unidad.

Tiene una alta sensibilidad *y* precisión, en un amplio campo de temperaturas; si se usa para medir la temperatura de superficies internas de recintos calentados uniformemente, da buenos resultados por encima de 1000ºF (538ºC).

Existen equipos de imágenes térmicas infrarrojas, que pueden realizar medidas cuantitativas o confeccionar imágenes cualitativas.

- Los que se utilizan para medidas cuantitativas y confección de niveles térmicos de temperatura se denominan radiómetros termográficos

- Los que se utilizan para la representación cualitativa son los visores térmicos; las unidades que escanean de forma electrónica son los visores piroeléctricos

La medida de temperaturas en el infrarrojo se aplica a superficies, como envolventes de caldera y tuberías de vapor aisladas.

Los pirómetros de radiación no sirven para determinar la temperatura de gases.

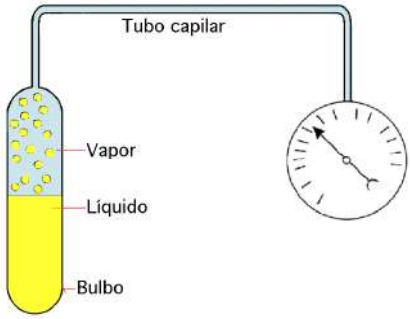

Fig XXXVI.10.- Termómetro por presión de vapor

Mide la temperatura en el bulbo mediante un manómetro graduado para temperaturas

PROPIEDADES ELÉCTRICAS.- Para la medida de temperaturas en plantas energéticas se usan el termómetro de resistencia eléctrica y el termopar.

Termómetro de resistencia eléctrica.- Se utiliza en un intervalo de temperaturas comprendido entre $\begin{cases} -400 \div 1800°F \\ -240 \div 982°C \end{cases}$; en su forma más simple, Fig XXXVI.11a, utiliza un puente *Wheatstone* siendo la lectura obtenida, la suma de las resistencias del hilo calibrado y de los conductores que conectan el hilo al puente; con un circuito más sofisticado, Fig XXXVI.11b, la resistencia de los conductores se elimina de la lectura del instrumento.

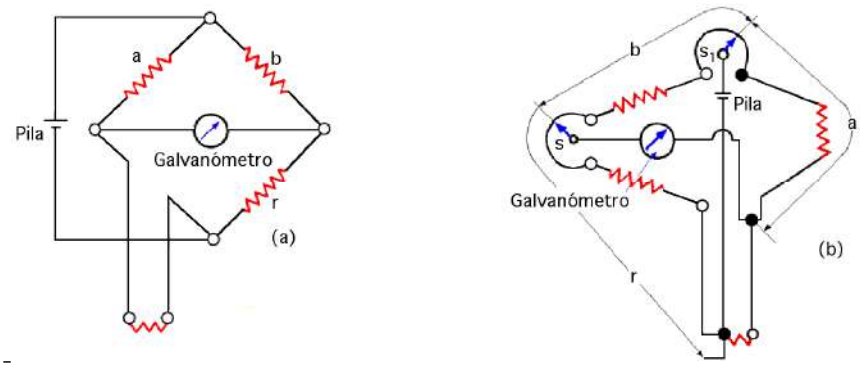

Fig XXXVI.11a.b.- Circuitos eléctricos para termómetros de resistencia

Para localizar el punto de toma de la temperatura, el hilo resistencia se configura como una pequeña bobina.

- Para temperaturas $\begin{cases} \text{- de } 250°F\ (121°C), \text{ las bobinas-resistencias son de níquel o cobre} \\ \text{- más elevadas se usa el platino} \end{cases}$

El termómetro de resistencia es un aparato estable y preciso, pero menos robusto y versátil que un termopar.

TERMOPARES.- Constan de dos conductores eléctricos de materiales distintos, unidos en sus extremos, configurando un circuito. Si una de sus uniones se mantiene a una temperatura

más alta que la otra, se genera una fuerza electromotriz que produce un flujo de corriente eléctrica a través del circuito, Figura XXXVI.12, que depende también del material de los conductores utilizados.

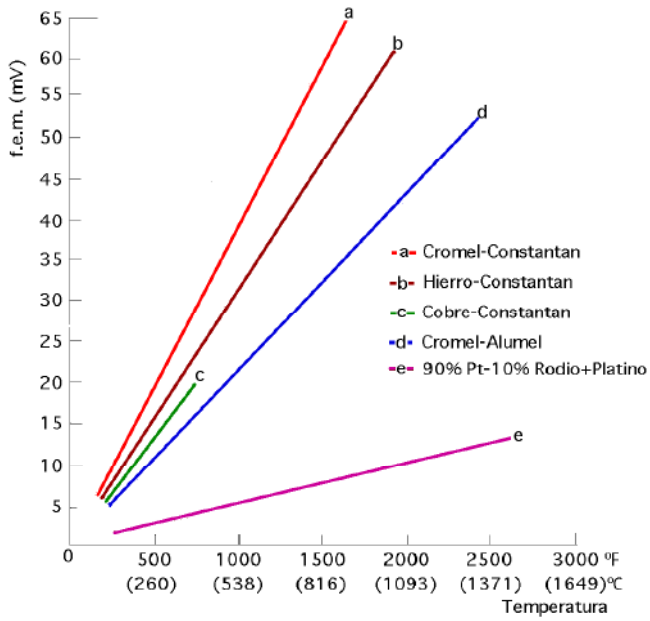

Fig XXXVI.12.- Relación entre la temperatura y la f.e.m. generada en diversos termopares

Circuitos múltiples.- Si dos o más termopares se conectan en serie, la *fem* en los terminales de salida es igual a la suma de todas las *fem* desarrolladas por los diferentes termopares.

Si dos o más termopares se conectan en paralelo, posibilitan la medida de temperaturas medias y de variaciones extremadamente pequeñas de temperaturas; las resistencias de cada termopar deben ser idénticas. El diámetro y longitud de los conductores del termopar, que no tienen importancia en condiciones estacionarias, afectan a la lectura del termopar cuando se modifica la temperatura.

Selección de materiales.- Los metales y aleaciones utilizados frecuentemente en termopares se indican en la Tabla XXXVI.9; su selección depende de que pueda soportar el ataque de la oxidación a la temperatura de operación.

Tabla XXXVI.9.- Tipos de termopares

Tipo de termopar	*Cobre (+) Constantan (-)*	*Hierro (+) Constantan (-)*	*Cromel (+) Constantan (-)*	*Cromel (+) Alumel (-)*	*90% Pt (+) 10% Rh-Pt (-)*
Intervalo de temperaturas	*- 300 /650°F (-184/343)*	*0 /1400°F (-18 /760°C)*	*- 300 /1600°F (-184/871°C)*	*0 /2300°F (-18/1260°C)*	*900/2600°F (482/1427°C)*
Temperatura máxima	*1100°F (593°C)*	*1800°F -982°C*	*1800°F -982°C*	*2500°F -1371°C*	*3190°F (1754°C)*
mV a 500°F(260°C)	*13,24*	*15,01*	*17,94*	*11,24*	*2,05*
Hilo magnético		*Hierro*		*Alumel*	

Constantan: 45%Ni + 55%Cu ; Cromel: 90%Ni + 10%Cu ; Alumel: 95%Ni + 5% (Al + Si + Mn)

La duración depende de: $\begin{cases} \text{- } el\ calibre\ del\ hilo\ conductor \\ \text{- } la\ utilización,\ o\ no,\ de\ camisas\ protectores \\ \text{- } la\ naturaleza\ de\ la\ atmósfera\ que\ rodea\ al\ termopar \end{cases}$

Los materiales de los termopares se deterioran cuando se exponen a las altas temperaturas de los humos y el aire, y en contacto con otros materiales.

Para temperaturas superiores a 1000ºF (538ºC), el platino resulta afectado por los óxidos metálicos, el carbono y gases hidrocarburados, experimentando una considerable desviación en su calibración. La vida útil se puede ampliar, a costa de minorar la velocidad de respuesta, mediante el uso de camisas protectoras de aleaciones o cerámicas.

Termopar encamisado.- Durante cierto tiempo se utilizaron termopares encamisados aislados con óxido de magnesio, en el que los hilos del termopar se aíslan con una envolvente de óxido de magnesio inerte, que protege los hilos de los efectos del medio ambiente.

Pueden ser, Fig XXXVI.13: $\begin{cases} \text{- } puesto\ a\ tierra \\ \text{- } no\ puesto\ a\ tierra \end{cases}$

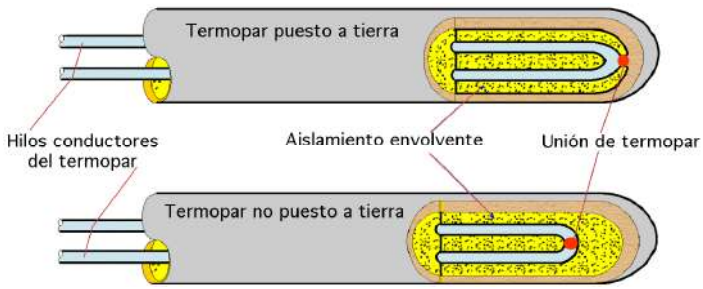

Fig XXXVI.13.- Termopares encapsulados

Las camisas son de $\begin{cases} \text{- } acero\ inoxidable \\ \text{- } materiales\ resistentes \end{cases}$ de modo que ofrezcan duración y resistencia importantes, frente a las atmósferas oxidantes, reductoras y corrosivas del entorno.

El termopar *puesto a tierra* tiene una respuesta rápida a los cambios de temperatura, pero no se puede utilizar para conexiones en serie o en paralelo, debido a la puesta a tierra de la camisa; para estas aplicaciones hay que utilizar el *no puesto a tierra*.

Los termopares encamisados se pueden complementar con chapas que se sueldan a los tubos, Fig XXXVI.14; esta disposición se aplica a la medida de temperaturas en calderas, colectores de sobrecalentadores y superficies tubulares.

Cuando las chapas están expuestas a temperaturas muy diferentes de las que tiene el cuerpo cuya temperatura se quiere medir, no se pueden utilizar, ya que la superficie metálica puede emitir o absorber calor.

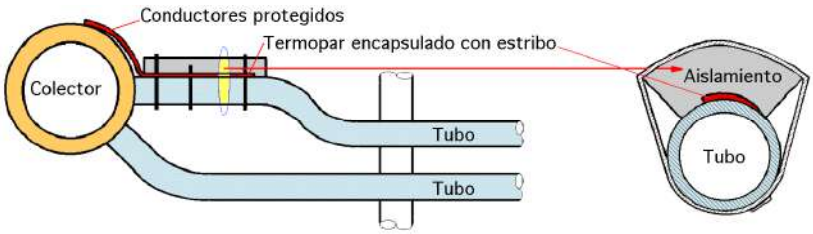

Fig XXXVI.14.- Termopar encapsulado con estribo

Hilos conductores en termopares.- Son los { *- compactos, normalizados y equilibrados* / *- de compensación, menos preciso*

En los *termopares de metales nobles*, para reducir su coste se utilizan hilos alargadores de Cu y de *Cu + Ni*, que tienen una característica *f.e.m.* que se aproxima a la del par del metal noble.

En los *termopares de metales comunes*, los hilos alargadores son de la misma composición que los hilos de los termopares, y más baratos.

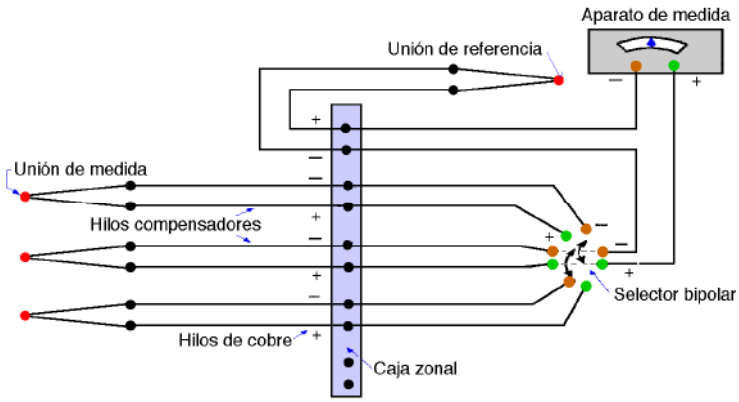

Fig XXXVI.15.- Disposición del termopar y conexión al aparato de medida a través de caja zonal

Para una mayor precisión en la medida, el hilo del termopar se utiliza a partir de la unión caliente, y atraviesa la zona de mayor gradiente de temperatura, hasta un punto próximo a la temperatura ambiente, en el que se empalma el hilo alargador conectado a la unión de referencia situada en el registrador o en el punto central de observación.

Si se utilizan varios termopares es económico establecer una caja zonal, Fig XXXVI.15, desde la que se montan hilos alargadores de cobre hasta el instrumento de medida, manteniendo la polaridad correcta uniendo hilos de la misma composición.

Unión caliente.- En ella, los elementos finos se hacen con hilos de termopares como se indica en la Fig XXXVI.16, empleándose para { *- su inmersión en flujos gaseosos* / *- insertar en un pozo termométrico* / *- contacto directo con superficies sólidas*

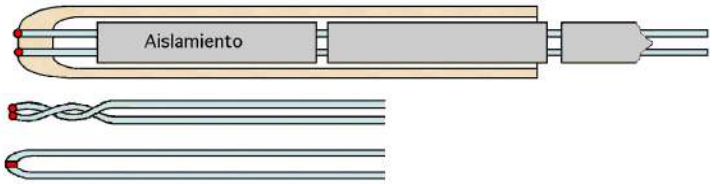

Fig XXXVI.16.- Termopar tubular y tipos de uniones calientes

Cuando haya que medir la temperatura de una superficie metálica, la unión caliente se configura embutiendo los dos hilos en agujeros taladrados sobre la superficie del metal, Fig XXXVI.17, en la que se pueden dar las siguientes situaciones, en las que el hilo del termopar:

a) Está arrollado al tubo, bajo el aislamiento; sistema bueno

b) Está adosado a lo largo de la pared del tubo, sistema bueno

c) Se saca directamente al exterior; sistema no apropiado

La temperatura medida es la de la superficie metálica, que es el primer punto de contacto de los conductores. Para instalaciones que cuentan con un elevado número de termopares, los extremos de los hilos del termopar se sueldan a la superficie de acero.

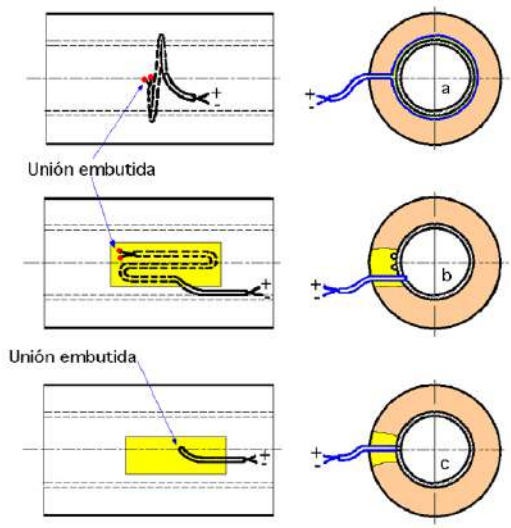

Fig XXXVI.17.- Prolongación de hilos de termopar embutido en pared

Medida de la temperatura de fluidos en tuberías.- La temperatura de un líquido, gas o vapor, que circula por el interior de una tubería, se mide con $\begin{cases} \textit{termómetro de} \begin{cases} \textit{cristal} \\ \textit{resistencia eléctrica} \end{cases} \\ \textit{termopar} \end{cases}$

El termómetro se inserta en una vaina inmersa en el flujo del fluido, la cual consiste en un trozo de tubo metálico, cerrado por uno de sus extremos y roscado o soldado por el otro a la pared de la tubería, de modo que sobresalga de ésta al exterior y penetre en el fluido, Fig XXXVI.18; con el fin de evitar pérdidas de calor, las partes del pozo térmico que sobresalen de la pared de la tu-

bería, así como la pared de ésta, deben aislarse térmicamente.

Por lo que respecta al diseño de la vaina, para un líquido o vapor saturado, el intercambio de calor entre el fluido y la vaina resulta totalmente satisfactorio si ésta tiene superficie lisa. Si el fluido es un gas o vapor sobrecalentado, se puede emplear una vaina aleteada.

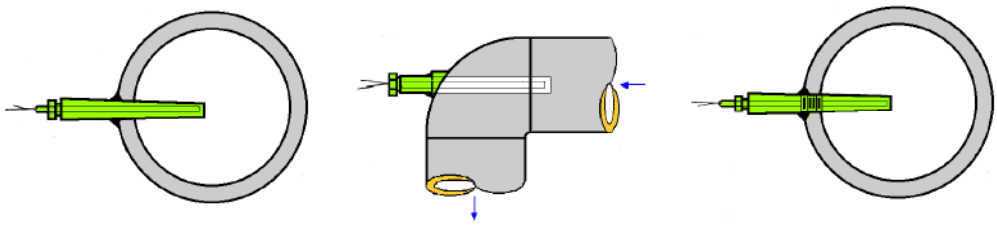

Fig XXXVI.18.- Instalación del pozo del termopar

Un termopar adosado a la superficie exterior de la pared del tubo puede proporcionar también buenos resultados.

Medida de la temperatura de los tubos.- El conocer la temperatura de los tubos de:

- Las paredes del hogar o de los bancos tubulares de la caldera, refrigerados por agua+vapor a la temperatura de saturación

- El economizador, refrigerados por agua a temperatura por debajo de la de saturación

- El sobrecalentador y del recalentador, refrigerados por vapor a temperatura por encima de la de saturación

sirve para:

- Determinar la seguridad de las partes a presión

- Uniformizar las temperaturas de los tubos que prestan la misma forma de servicio en circuitos de flujo en paralelo

- Uniformizar la diferencia de temperaturas del fluido entre entrada y salida

El termopar con unión caliente embutida, Fig XXXVI.17, es una solución satisfactoria y simple de instalar un termopar, para medir la temperatura tubular.

El termopar encamisado de la Fig XXXVI.14 se utiliza para vigilar la temperatura de tubos no expuestos a calor externo.

Cuando el termopar de superficie se instala adecuadamente, se puede utilizar para medir la temperatura del metal y del fluido.

Tubos de paredes de hogar.- Hay que disponer de protecciones para el termopar e hilos conductores, a causa de la atmósfera destructiva del hogar a alta temperatura, y de la acumulación y desprendimiento de cenizas en polvo y escoria.

Una técnica que se ha desarrollado utiliza agujeros cordales de forma que los hilos del termopar se acomodan en el metal del tubo, Fig XXXVI.19, siendo un método satisfactorio para medir la temperatura del metal de los tubos de las paredes de hogar; la superficie tubular no ofrece resaltes, los hilos del termopar quedan protegidos y la conducción térmica en la unión caliente se minimiza, por cuanto los hilos pasan por una zona isoterma, antes de separarse del tubo, hacia el exterior.

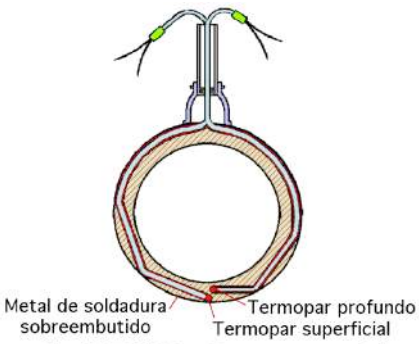

Fig XXXVI.19.- Termopar cordal

Los agujeros cordales deben ser tan pequeños como sea posible, para minimizar su efecto sobre el perfil del flujo térmico, dentro del metal del tubo; su influencia es mínima en la dirección del esfuerzo tangencial, y tolerable en la dirección de la tensión longitudinal.

Esta técnica sirve también para medir el gradiente de temperaturas en la pared del tubo, siendo un método fiable para $\begin{cases} \text{- } \textit{determinar el flujo calorífico que atraviesa la pared} \\ \text{- } \textit{detectar la acumulación de incrustaciones internas} \end{cases}$

La sección tubular presentada en la Fig XXXVI.19 visualiza la instalación de los termopares cordal superficial *y* profundo, según su proximidad a la superficie tubular exterior. El gradiente de temperaturas se representa por una recta, Fig XXXVI.20; las temperaturas son función del espesor equivalente de recorrido del flujo, $l_{eq} = R\ ln\ \frac{R}{r}$, siendo $\begin{cases} R \textit{ el radio exterior del tubo} \\ r \textit{ el radio interior del tubo} \end{cases}$

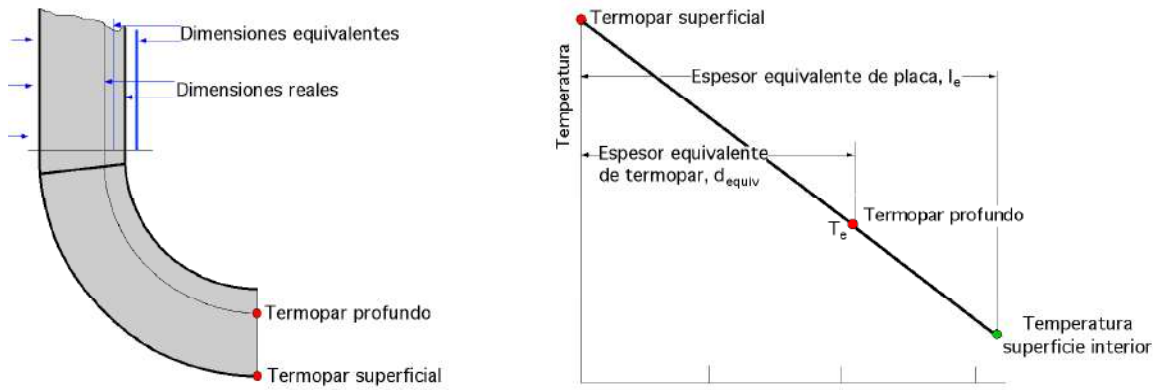

Fig XXXVI.20.- Instalación de termopar cordal y representación del flujo calorífico

Teóricamente, la recta pasa por los puntos de temperatura superficial y profunda Fig XXXVI.21, y corta a la línea de la superficie interna de la placa equivalente, a una temperatura ligeramente superior a la del fluido, que se mide por un termopar embutido en la superficie del tubo diametralmente opuesta a la del hogar; es difícil obtener taladros cordales que reflejen exactamente una distribución como la representada.

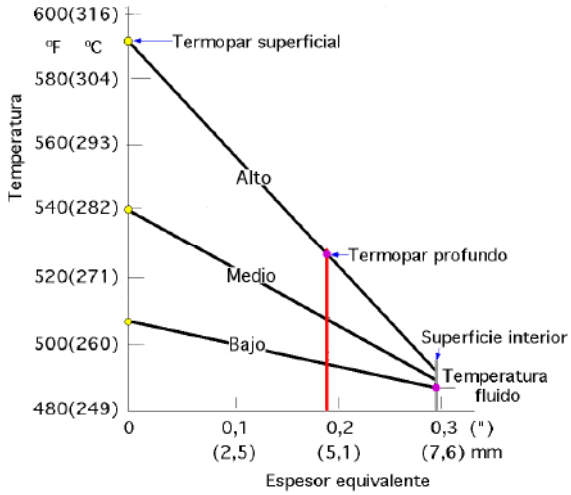

Fig XXXVI.21.- Trazado del gradiente de temperaturas para diversos flujos caloríficos, bajo, medio y alto

El pequeño exceso de temperatura sobre la del fluido representa la caída de temperatura a través de la película laminar de fluido, que se incrementa al aumentar el aporte de calor. Si éste es bajo, y la recta definida por los puntos de temperatura superficial y profunda corta a la línea correspondiente a la superficie interna del espesor equivalente, en una temperatura igual o ligeramente superior a la del fluido, la recta se considera como totalmente satisfactoria.

Si el corte está por debajo o muy por encima de la temperatura del fluido, se realiza una corrección que consiste en trazar una recta que pase por la temperatura del termopar superficial y por la del fluido en la superficie interna del espesor equivalente; la ubicación del termopar profundo se ajusta en el punto de la recta que tiene la temperatura del termopar profundo, Fig XXXVI.22.

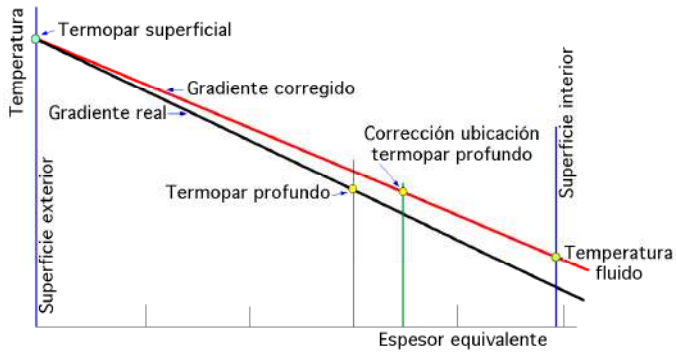

Fig XXXVI.22.- Ajuste del gradiente de temperaturas

PROPIEDADES ACÚSTICAS.- En los gases varían con la temperatura y son un indicativo de la misma; la velocidad del sonido en un gas es directamente proporcional a la raíz cuadrada de su temperatura absoluta:

$$c_s = \sqrt{\frac{g_c k R T}{M}} \left(\frac{ft}{seg} \right) \text{, siendo: } \begin{cases} g_c = 32{,}17\ (lbm.ft/lbf.seg^2\ ) \\ k \text{ la relación de calores específicos} \\ R \text{ la constante universal de los gases: } 1545\ (ft.lb/mol°R) \\ T \text{ la temperatura absoluta: } °R = °F + 460° \\ M \text{ el peso molecular, } (lb/mol) \end{cases}$$

Midiendo el tiempo que tarda el sonido en recorrer una determinada distancia a través del gas, se puede calcular la temperatura media de éste, lo que se aprovecha para medir la temperatura de humos y gases en un hogar

MEDIDA DEL FLUJO TÉRMICO.- Se determina por la ecuación

$$q = \frac{k\,(T_1 - T_2)}{l_{eq}}$$

siendo T_1 la temperatura del termopar superficial (exterior) y T_2 la del termopar profundo (interior).

La medida del flujo térmico a través de la pared tubular, utilizando termopares de gradiente, constituye una orientación aproximada más que una medida.

DETECCIÓN DE INCRUSTACIONES.- La acumulación de incrustaciones internas en la zona de termopares cordales, se detecta por un aumento en la diferencia de temperaturas, entre la superficie interna (termopar profundo) y la de saturación.

La naturaleza de algunos tipos de incrustaciones hace que éstas se acumulan de forma uniforme, como ocurre por ejemplo con los $\begin{cases} - \textit{ carbonatos} \\ - \textit{ sílice} \end{cases}$, o de forma irregular, como los óxidos de hierro.

La ubicación de las incrustaciones no uniformes es completamente aleatoria, y en esta situación el gradiente de temperatura *no* resulta fiable para la detección de las incrustaciones.

Cuando la media de las temperaturas de los termopares cordales $\begin{cases} - \textit{ superficial} \\ - \textit{ profundo} \end{cases}$, se aproxima al límite de la temperatura del metal, la caldera se debe retirar de servicio y se tiene que inspeccionar su superficie interna tubular. Para lograr una rápida determinación en la variación de las incrustaciones internas de los tubos, se hacer uso de un sistema de coordenadas Fig XXXVI.23, en el que:

- Las ordenadas son la diferencia de temperaturas entre los termopares superficial y profundo

- Las abscisas son la diferencia de temperaturas entre el termopar superficial y el fluido

Si el tubo está limpio, todos los puntos se encuentran en una recta; si hay incrustaciones, la abscisa aumenta, para la misma ordenada.

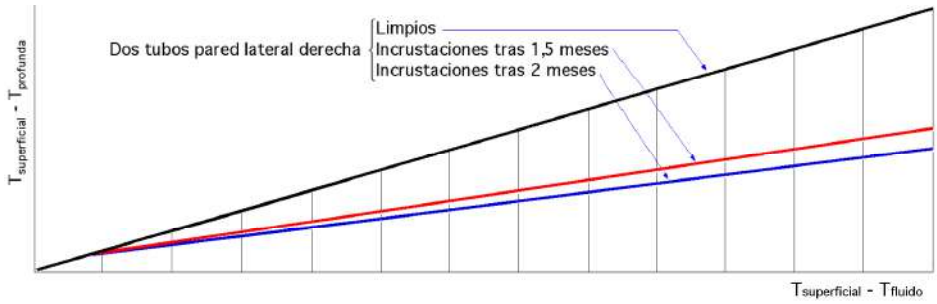

Fig XXXVI.23.- Representación de la temperatura de termopares cordales según las incrustaciones

XXXVI.4.- APLICACIÓN A SOBRECALENTADORES Y RECALENTADORES

Los termopares cordales se pueden emplear para medir la temperatura del metal de los tubos de sobrecalentadores y recalentadores inmersos en un flujo de humos, utilizando lo anteriormente descrito.

Los hilos del termopar entre la unión caliente y el punto de salida de la envolvente de la caldera se protegen, introduciendo el termopar encamisado en un tubo de acero inoxidable refrigerado, que se suelda al tubo correspondiente del sobrecalentador o del recalentador; de esta forma, el tubo protector y el estribo del termopar se mantienen a la misma temperatura que el tubo del sobrecalentador o recalentador.

Medida de la temperatura de los humos.- El elemento sensible inmerso en los humos, recibe calor por convección y radiación, e incluso por conducción a través del propio instrumento.

Si la temperatura de las superficies de su entorno no difiere de la de los humos, la temperatura indicada por el instrumento representa exactamente la temperatura de los humos.

Si la temperatura de las superficies de su entorno es superior *o* inferior a la de los humos, la temperatura indicada es mayor *o* menor que la temperatura de los humos, respectivamente.

La posible desviación con respecto a la temperatura real de los humos depende de:

- *La temperatura y velocidad de los humos*
- *La temperatura del medio en el entorno*
- *El tamaño, construcción y soportes del instrumento de medida*

Para corregir errores en la medida de la temperatura debidos al medio ambiente del entorno, el instrumento se calibra por medio de una fuente conocida y fiable.

A título de ejemplo, para un termopar liso utilizado para medir la temperatura de los humos en calderas, economizadores o calentadores de aire, con paredes del recinto más frías que los humos, el error observado en la lectura se deduce de la Fig XXXVI.24

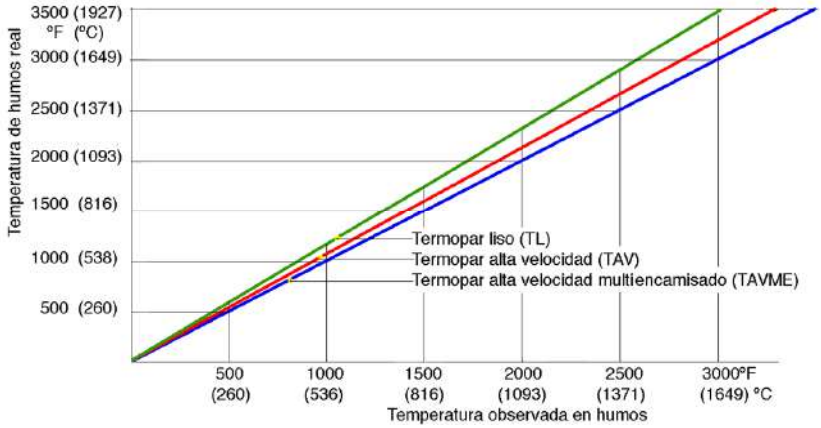

Fig XXXVI.24.- Magnitud del error observado al medir la temperatura del recinto de la caldera

Termopar de alta velocidad.- El diseño y funcionamiento de una unidad generadora de vapor, dependen de la correcta valoración de la temperatura de los humos en el hogar y en las secciones del sobrecalentador. El diseño de la caldera, para alcanzar unas buenas características técnicas operativas, debe tener en cuenta:

- *El límite impuesto por la temperatura admisible en el metal de los tubos del sobrecalentador*
- *Las características de fusibilidad de la ceniza (escoria y polvo) del combustible*

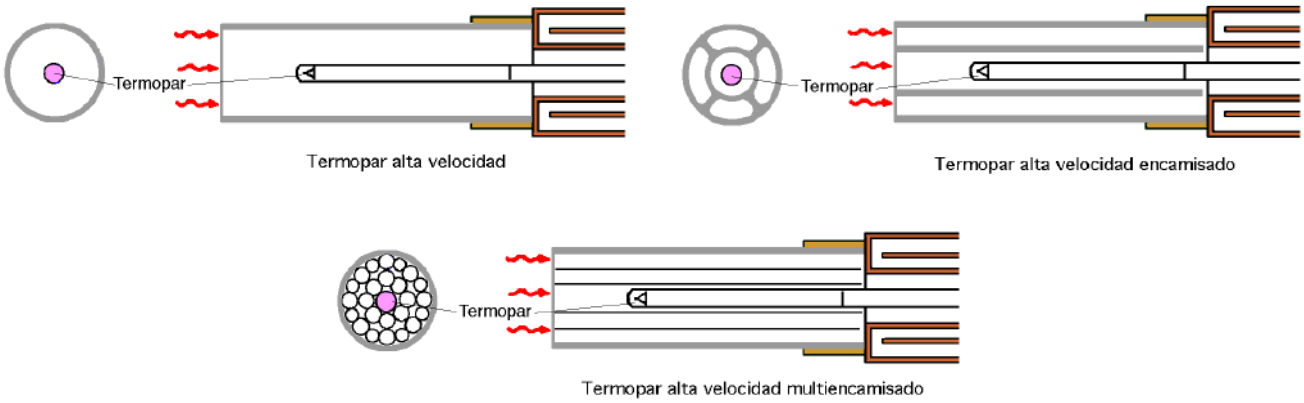

Fig XXXVI.25.- Termopares encamisados de alta velocidad (TAV) y (TAVME)

El pirómetro óptico y el de radiación no están diseñados para medir la temperatura de los humos en el hogar y en las áreas del sobrecalentador; si se utiliza el termopar liso se pueden cometer grandes errores, por lo que se recurre a los termopares de alta velocidad (TAV) y de alta velocidad con multiencamisado (TAVME), desarrollados para corregir el efecto de la radiación, siendo los mejores instrumentos para medir $\begin{cases} \textit{altas temperaturas de humos en ambientes fríos} \\ \textit{bajas temperaturas de humos en ambientes calientes} \end{cases}$

En la Fig XXXVI.25 se representa la sección transversal de termopares de alta velocidad, simples (TAV) y multiencamisados (TAVME), desarrollados para su utilización en los ensayos de

calderas.

Las superficies termointercambiadoras $\begin{cases} \text{- paredes refrigeradas por agua} \\ \text{- bancos tubulares de } \begin{cases} \text{- el sobrecalentador} \\ \text{- la caldera} \end{cases} \end{cases}$ que rodean un termopar en un conducto de humos están más frías que los humos por lo que la lectura del termopar liso no encamisado es menor que la del termopar de alta velocidad (TAV); por esta razón, un (TAV) indica valores menores que un (TAVME).

En la Fig XXXVI.24 se comparan los resultados obtenidos con un par de termopares lisos, uno (TAV) y otro (TAVME), para un hogar de caldera.

- Las medidas del (TAVME) se aproximan a la temperatura real de los humos

- En este diseño, la unión caliente del termopar se rodea por camisas múltiples, recibiendo calor por convección, como consecuencia del alto flujo de humos

- El intercambio térmico por radiación se reduce, por lo que no hay intercambio térmico por radiación entre la unión caliente y la camisa más interna

El diseño de un (TAVME) presenta una sección de paso de humos muy pequeña, que se recubre rápidamente con la ceniza *(escoria y polvo)*, por lo que su uso se restringe a humos limpios.

En el caso de humos cargados con polvo o escoria se usa el (TAV), cuya lectura hay que corregir, comparando resultados obtenidos en gases limpios con un (TAV) y con un (TAVME).

Para temperaturas superiores a 2200ºF (1204ºC) se usan termopares de metales nobles, que hay que proteger de la contaminación de humos y ceniza que los gases lleven en suspensión.

En la Fig XXXVI.25 se presentan diversas camisas, que facilitan protección a los hilos del termopar, cuando la obstrucción se produce a consecuencia de la escoria fundida a temperaturas superiores a 2400ºF (1.316ºC).

Cuando se utilizan termopares de platino en humos a más de 2600ºF (1.427ºC), se pueden producir desviaciones notables en la calibración, incluso cuando el tiempo requerido para tomar una medida sea de sólo algunos minutos.

Cuando el error es del orden de $\begin{cases} 40 \div 60 ^\circ F \\ 22 \div 33 ^\circ C \end{cases}$, se elimina el extremo contaminado del termopar, y se rehace la unión caliente usando la porción sana de los hilos del termopar.

Cuando la diferencia de temperaturas entre la unión caliente y las superficies del entorno circundante aumenta, el efecto de la radiación se incrementa, ya que el intercambio térmico por radiación es proporcional a la diferencia de las cuartas potencias de la temperatura absoluta de la fuente y del receptor.

El intercambio térmico por convección es proporcional a la velocidad de los humos y a la diferencia de temperaturas de los humos y del termopar; por lo que si se incrementa la velocidad másica y la transferencia por convección hacia el termopar, la temperatura de la unión caliente se acerca más a la temperatura real de los humos, a la vez que el encamisado protege la unión caliente de la radiación.

En la Fig XXXVI.26 se muestra una sonda portátil de un termopar de alta velocidad *(*TAV*)*, para medir altas temperaturas de humos en generadores de vapor. La unión caliente está rodeada por una camisa tubular de porcelana, por el interior de la cual circula un flujo de humos a alta velocidad, mediante el tiro inducido que crea un aspirador incorporado al equipo de la sonda; la aspiración de humos hacia el punto de medida se comprueba mediante un orificio calibrado que lleva el aspirador, conectado a la sonda por medio de una manguera flexible; la velocidad másica de humos hacia la unión caliente del termopar es del orden de 15000 lb/ft^{2}h (20,34 kg/m^{2}seg).

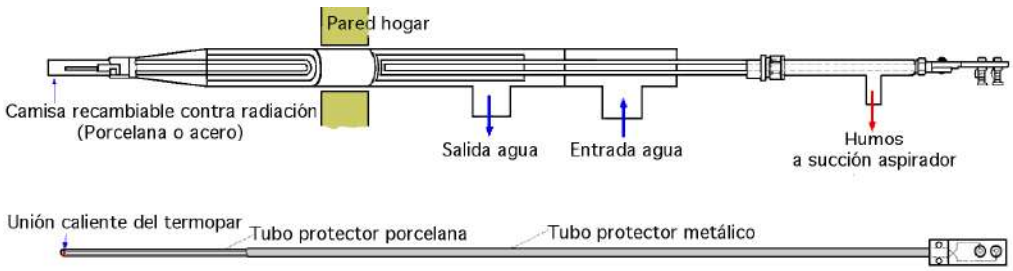

Fig XXXVI.26.- (TAV) refrigerado por agua para humos a temperaturas elevadas

Los grandes generadores de vapor presentan grandes variaciones de la medida real de la temperatura en distintos puntos, precisándose de métodos matemáticos para ponderar los diferentes valores y fijar sólo uno como representativo del conjunto; la temperatura media se afina incrementando el número de puntos o con un instrumento de diseño especial.

Para proteger el equipo se considera la temperatura máxima de los humos y no la media. Cuando en una puesta en servicio aumenta la presión de la caldera y antes de que el vapor fluya por los tubos del sobrecalentador o recalentador, se instala un termopar liso, aguas arriba de los tubos, para tener referencia de la temperatura máxima y prevenir el recalentamiento de los tubos.

MEDIDA DE LA TEMPERATURA DEL AISLAMIENTO Y ENVOLVENTES

Superficies aislantes externas.- Hay que seleccionar el método de medida para evitar errores en la medida de la temperatura superficial del aislamiento, que carece de envolvente externa. La sujeción del termopar a la superficie del aislamiento influye poco en el flujo de la transmisión de calor a través del aislamiento, y desde la superficie al medio ambiente.

El termopar de contacto se presiona sobre la superficie a medir, pero no es apto para las superficies de aislamiento, porque:

- El instrumento enfría la superficie en el punto de contacto

- El reducido calor transferido a través del aislamiento impide un adecuado flujo térmico desde los alrededores hacia el punto de contacto

Si el termopar se coloca en un aislamiento que está en estado plástico, la unión caliente del termopar y los hilos conductores se presionan contra la superficie del mismo, quedando adheridos cuando el aislamiento se endurece al terminar su fraguado.

Si el aislamiento está duro *y* seco, la unión caliente y los hilos conductores del termopar se fijan en la superficie, utilizando la menor cantidad posible de cemento adherente.

Si la fijación de los hilos sobre la superficie del aislamiento es por medio de grapas, se introducen errores que afectan a la transferencia por conducción.

Si los hilos del termopar se cubren con cinta aislante, las características del intercambio térmico en la superficie se modifican por cuanto se introduce una capa aislante indeseable entre los hilos del termopar y el aire ambiente.

Envolventes de acero.- La temperatura de la envolvente de acero de una caldera se mide con termopares de contacto, exactamente, porque el flujo térmico desde las áreas metálicas próximas compensa la pequeña cantidad de calor tomada por el instrumento en el punto de contacto.

La unión caliente del termopar se configura embutiendo o soldando los hilos del mismo en la superficie del metal, de forma que se minimice cualquier posible perturbación en el intercambio térmico entre la superficie y la atmósfera ambiente.

La temperatura aproximada de la superficie, siempre que el metal sea macizo y tenga una temperatura cercana a la del ambiente, se mide con pinturas, tizas de fusión y, algunas veces, con termómetros que se fijan a la superficie metálica con masilla; no es aceptable para medir temperaturas de las envolventes de caldera, y de la superficie de un aislamiento cualquiera.

Los $\begin{cases} \textit{- nervios de acero embebidos en el aislamiento} \\ \textit{- espárragos o bastidores de puertas que atraviesan el aislamiento} \end{cases}$ provocan importantes perturbaciones locales en la temperatura superficial, y su influencia se puede extender lateralmente a lo largo de otras áreas próximas de la envolvente.

Para medir la temperatura de superficies se pueden utilizar cámaras infrarrojas con las que se minimiza la necesidad de complejas instalaciones de termopares, en especial si se realizan medidas que cubran grandes superficies, grabando en cinta magnética los resultados obtenidos.

XXXVI.5.- MEDIDA DEL TÍTULO Y PUREZA DEL VAPOR

Los métodos de medida más comunes son:

- Trazador de Na (fotometría de llama), con registro de sólidos disueltos en vapor, se usa para precisión máxima

- Conductividad eléctrica (para sólidos disueltos); se usa mucho, pero es menos exacto

- Calorímetro de laminación (para el título), no siendo apto para { *- arrastres muy pequeños* ; *- presiones > 600 psi (41,4 bar)* }

- Gravimetría (para sólidos totales); requiere análisis de muestras voluminosas, y no detecta puntas transitorias

Cada uno de estos métodos se describe en el *Código de Ensayo de Características (Performance Test Code,* PTC-19.11*)* de ASME, con el título *Water and Steam in the Power Cycle*.

El calorímetro de laminación determina directamente el título del vapor, mientras que con los demás métodos se obtiene el contenido total de sólidos.

La mayor parte de los sólidos disueltos en el vapor proceden de los que contiene el agua de caldera debido al arrastre de gotitas de agua, por el vapor.

El título del vapor y el contenido de sólidos totales en el mismo, se relacionan por la ecuación:

$$x = 100 - \frac{100\ Sólidos\ en\ vapor}{Sólidos\ en\ agua\ caldera}\ ,\ siendo:\ \left\{\begin{array}{l} x\ el\ título\ del\ vapor,\ \% \\ sólidos\ en\ vapor \\ sólidos\ en\ agua\ caldera \end{array}\right\}\ en\ ppm\ en\ peso$$

que está sujeta a errores, como resultado de:

- El arrastre de sólidos disueltos en el vapor

- Sólidos vaporizados, como la sílice, para presiones superiores a 2000 psi (137,9 bar)

Obtención de la muestra de vapor.- Si se desea precisión en el título de vapor, los instrumentos tienen que manipular una muestra de vapor que sea completamente representativa.

El diseño de la tobera de muestra debe cumplimentar lo establecido en el *Código de Ensayo de Características (Performance Test Code,* PTC = 19.11*)* de ASME, y se debe situar aguas abajo de un tramo recto de tubería, cuya longitud mínima sea 10 veces el diámetro de ésta con el siguiente orden preferencial:

- En tubería vertical con flujo { *- descendente* ; *- ascendente* }

- En tubería horizontal con inserción { *- vertical* ; *- horizontal*

La toma se debe instalar en una tubería de vapor saturado, en el plano del codo o curva precedente, de modo que su abertura se enfrente al flujo del vapor.

En calderas que cuentan con múltiples tubos de alimentación al sobrecalentador, las toberas de toma de muestras se colocan en tubos espaciados regularmente a lo ancho de la unidad, (largo del calderín); la separación entre tomas no debe superar los 5 ft (1,52 m).

Cuando se emplea un calorímetro de laminación, la conexión entre la tobera de toma de muestras y el calorímetro debe ser corta, y estar bien aislada para minimizar las pérdidas por radiación; todo el sistema debe ser totalmente estanco al vapor, de forma que el aislante se mantenga seco.

Cuando la pureza del vapor se ensaya por conductividad o por técnicas trazadoras de sodio, los tubos que unen la tobera con el condensador correspondiente deben ser de acero inoxidable, con un diámetro interior no superior a 0,25"(6,4 mm) y longitud mínima, para reducir la capacidad de almacenamiento de la línea.

Cuando existen varias tomas de muestras, se pueden reunir todas en una misma línea que va al condensador; cada conexión dispone de una válvula individual, para poder tomar la muestra independiente de las demás, discriminando así cualquier tipo de arrastre selectivo.

Los serpentines de refrigeración, o condensadores, se ubican cerca de las toberas de toma de muestras, para minimizar la posible sedimentación de sólidos en la línea.

Método trazador de Na.- Esta técnica permite realizar medidas de impurezas de sólidos disueltos en el condensado del vapor, del orden de 0,001 ppm; el Na existe en el agua de la caldera si el acondicionamiento químico de ésta se ha realizado con productos sólidos.

La relación de los sólidos totales disueltos entre $\begin{cases} \text{- } vapor\ condensado \\ \text{- } agua\ de\ caldera \end{cases}$, es proporcional a la relación de Na entre $\begin{cases} \text{- } vapor\ condensado \\ \text{- } agua\ de\ caldera \end{cases}$

Una vez determinando el Na presente en el $\begin{cases} \text{- } vapor\ condensado \\ \text{- } agua\ de\ caldera \end{cases}$ así como los sólidos disueltos en ésta, se calcula el $\begin{cases} \text{- } total\ de\ sólidos\ disueltos\ en\ el\ vapor \\ \text{- } porcentaje\ de\ humedad\ arrastrada\ por\ el\ vapor \end{cases}$

El contenido de Na en el $\begin{cases} \text{- } vapor\ condensado \\ \text{- } agua\ de\ caldera \end{cases}$ se determina mediante un fotómetro de llama, para detectar con rapidez la influencia provocada en el arrastre, por cualquier modificación de las condiciones operativas de la caldera, Fig XXXVI.27, en la que:

- *La muestra de vapor condensado se aspira por un pequeño tubo ubicado en el quemador de una*

llama de hidrógeno + oxígeno, a la temperatura de $\begin{cases} 3000 \div 3500^{\circ}F \\ 1649 \div 1927^{\circ}C \end{cases}$ *; el agua vaporiza, excita los átomos de Na, y emite una luz amarilla a una determinada longitud de onda que constituye una medida del Na presente en la muestra; la intensidad de la luz se mide en un espectrofotómetro equipado con un fotomultiplicador*

- La luz de la llama se concentra mediante un espejo colector y se envía al espejo de entrada que la desvía, a través de la hendidura de entrada, hacia un espejo plano en el que se refleja hacia un prisma de dispersión, descomponiéndose en distintas longitudes de onda

- La longitud de onda deseada se selecciona ajustando la posición del prisma, vuelve al espejo plano, en el que se refleja hacia la hendidura de salida y lente correspondiente, incidiendo finalmente en un tubo fotomultiplicador

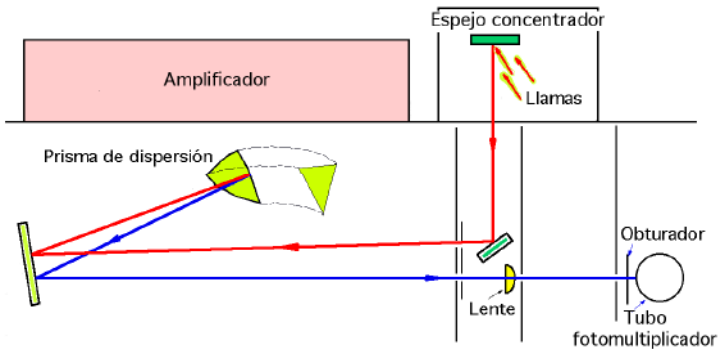

Fig XXXVI.27.- Esquema del método operativo de un sistema de fotometría de llama

El Na presente en la muestra se obtiene comparando la emisión de la muestra de agua, con otras emisiones de muestras obtenidas de soluciones con concentraciones de Na conocidas.

El ***método de conductividad eléctrica*** para determinar la pureza del vapor en generadores de vapor, se aplica a unidades que funcionan con:

- Grandes concentraciones de sólidos en el agua de la caldera

- Un contenido total de sólidos en el vapor superior a 0,5 ppm

El método se basa en que los sólidos disueltos (ácidos, bases o sales) están completamente ionizados en solución diluida, y conducen la electricidad proporcionalmente al total de sólidos disueltos.

Sobre la base de los sólidos que están normalmente presentes en el agua de la caldera, el contenido de sólidos expresado en partes por millón, se obtiene multiplicando por 0,055 la conductividad eléctrica de la muestra en $(\mu Mho/mm)$, es decir, $(ppm) = 0{,}055\ (\mu Mho/mm)$

La muestra de condensado no debe tener gases disueltos, especialmente NH_3 y CO_2.

Los *gases presentes* no influyen en el contenido de sólidos disueltos en la muestra de vapor condensado, pero sí tienen una notable influencia en la conductividad eléctrica.

Calorímetro de laminación.- Cuando el vapor se expande adiabáticamente sin realizar un trabajo (laminación), tal como ocurre cuando atraviesa un orificio, la entalpía permanece constante a lo largo de la evolución entre las presiones inicial y final, en el supuesto de que no haya variación de la velocidad del vapor.

En un diagrama de Mollier, cualquier vapor húmedo con entalpía superior a 1150 Btu/lb (2675 kJ/kg), pasa a vapor sobrecalentado cuando se lamina hasta la presión atmosférica; éste parámetro y la temperatura del vapor laminado hasta la presión atmosférica, definen la entalpía de éste vapor que junto con la presión inicial permiten calcular el % de humedad presente en la muestra del vapor húmedo inicial.

El calorímetro tiene un orificio para laminar la muestra de vapor en el interior de una cámara, con salida a la atmósfera, donde se mide la temperatura del vapor laminado a la presión atmosférica.

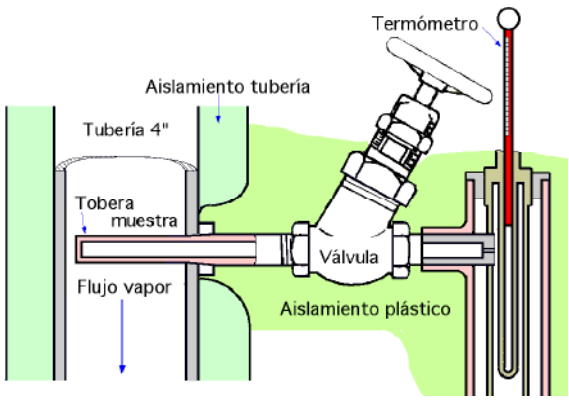

Fig XXXVI.28.- Calorímetro de laminación con tubo de toma de muestra en tubería de vapor

Para unidades de menos de 600 psi (41,4 bar), se utiliza el calorímetro que se representa en la Fig XXXVI.28, que proporciona buenos resultados en los siguientes campos de títulos del vapor, hasta $\begin{cases} 4{,}3\% \text{ para } 100 \text{ psi } (6{,}9 \text{ bar}) \\ 5{,}6\% \text{ para } 200 \text{ psi } (13{,}8 \text{ bar}) \\ 7\% \text{ para } 400 \text{ psi } (27{,}6 \text{ bar}) \end{cases}$

El diámetro de los orificios es de $\begin{cases} 0{,}125'' \ (3{,}175 \text{ mm}) \text{ desde la presión atm. hasta } 450 \text{ psi } (31 \text{ bar}) \\ 0{,}0625'' \ (1{,}588 \text{ mm}) \text{ desde } 450 \div 600 \text{ psi } (31{,}4 \div 41{,}4 \text{ bar}) \end{cases}$

El termómetro se sumerge en aceite con un punto de inflamación elevado.

El calorímetro se pone en servicio abriendo a tope la válvula de cierre y permitiendo que el vapor descargue, a través de la unidad, hacia la atmósfera; la temperatura del vapor laminado *y* sobrecalentado se mide con un termómetro; la temperatura observada es menor que la real, debi-

do a: $\begin{cases} \text{- } La\ radiación\ de\ la\ instalación\ del\ calorímetro \\ \text{- } Las\ correcciones\ termométricas\ e\ irregularidades\ del\ orificio \end{cases}$

Para obtener una corrección adecuada, hay que determinar la temperatura T_{ins} (como instalado) a la cual la caldera proporciona vapor saturado seco; para ello debe estar a un 20% de su capacidad nominal en régimen permanente, con una baja concentración en agua y nivel constante en el calderín.

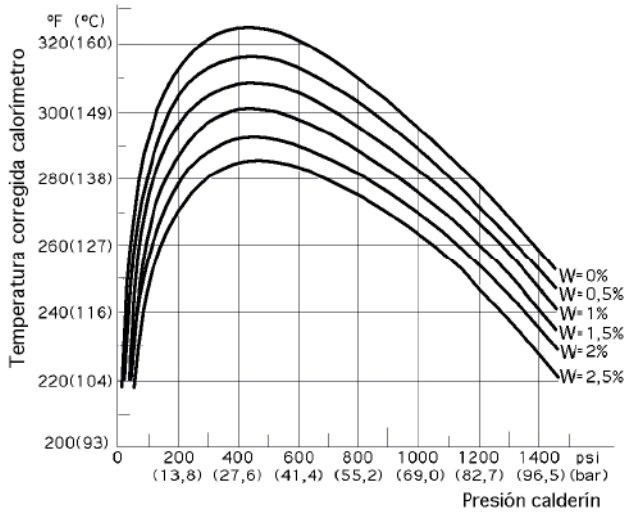

Fig XXXVI.29.- Relación entre el % de humedad en el vapor, la temperatura del calorímetro y la presión del calderín

La $T_{corregida}$ del calorímetro es la diferencia entre la temperatura teórica, leída en la curva de humedad cero de la Fig XXXVI.29, y la temperatura T_{ins}; la corrección normal no debe exceder de 5ºF.

El valor de W de la Fig XXXVI.29, es el % de humedad en la muestra de vapor:

$$W = 100\ \frac{(i_s - 1150{,}4) - 0{,}485\ (T_{corregida} - 212)}{r_{l\text{-}v}}$$

$$siendo \begin{cases} i_s\ \ la\ entalpía\ del\ vapor\ saturado\ a\ la\ presión\ del\ calderín\ en\ Btu/lb \\ r_{l\text{-}v}\ \ el\ calor\ latente\ de\ vaporización\ a\ la\ presión\ del\ calderín\ en\ Btu/lb \\ T_{corregida}\ ,\ la\ temperatura\ corregida\ del\ calorímetro\ en\ °F°(C) \end{cases}$$

$$Si\ el\ valor\ de\ la\ corrección\ calculada\ excede\ este\ límite,\ es\ posible\ que\ el \begin{cases} \text{- } orificio\ está\ atorado \\ \text{- } aislamiento\ tenga\ defectos \\ \text{- } ensayo\ es\ incorrecto \end{cases}$$

Cuando la unidad se utiliza para determinar el título de una muestra de vapor húmedo, el % de humedad se deduce de la Fig XXXVI.29, entrando con la presión de calderín y la $T_{corregida}$ del calorímetro; si éste está bien instalado, aislado y funcionando adecuadamente, los resultados son exactos para un vapor húmedo con contenidos de agua del orden de 0,25%, en el caso de una

caldera a baja presión. Para presiones superiores a 600 psi (41,4 bar), o para medir la pureza del vapor con mayor exactitud en el campo de pocos ppm, hay que utilizar otros métodos de medida.

Análisis gravimétrico.- Se utiliza para determinar una medida exacta de la cantidad de sólidos totales presentes en una muestra de vapor condensado; consiste en evaporar una cantidad determinada de vapor condensado, hasta obtener un residuo seco, cuyo peso se calcula exactamente; su principal desventaja son las grandes cantidades de agua que se necesitan durante un período de tiempo prolongado.

XXXVI.5.- MEDIDA DE CAUDALES

Los dispositivos para medir caudales son: $\begin{cases} \text{- el orificio calibrado} \\ \text{- la tobera aforadora} \\ \text{- el tubo Venturi} \end{cases}$

La caída de presión (presión diferencial) sirve para medir el caudal de cualquier fluido que atraviesa un orificio, una tobera o un tubo Venturi, y se determina por la expresión:

$$Q = C_q \; k\, A \sqrt{\frac{2\, g_c \;\; \rho_1 \; (p_1 - p_2)}{1 - \zeta^4}}$$

en la que:

Q *es el caudal, lb/s*

C_q *es el coeficiente de descarga, adimensional, que depende de* $\begin{cases} \text{- el tipo de aparato} \\ \text{- su dimensión} \\ \text{- su instalación} \end{cases}$

k *es un factor de compresibilidad, igual a 1 para líquidos y gases si* $\Delta p < 20\%$ *de la presión aguas arriba*

A *es el área de la sección recta del cuello,* ft^2

g_c *es una constante de proporcionalidad: 32,17* $lbm.ft/lbf.seg^2$

p_1 *es la presión estática aguas arriba,* lb/ft^2

p_2 *es la presión estática aguas abajo,* lb/ft^2

ζ *es la relación entre diámetros* $\dfrac{cuello}{tubería}$

ρ_1 *es la densidad a presión y temperatura aguas arriba,* lb/ft^3

Ventajas de cada tipo de medidor elemental:

Orificio: $\begin{cases} \text{- Coste mínimo} \\ \text{- Fácil instalación y sustitución} \\ \text{- Coeficiente de descarga bien definido} \\ \text{- Sin obstrucciones ni desgaste durante el funcionamiento} \\ \text{- Borde vivo sin suciedad por óxidos o materias en suspensión} \end{cases}$

Tobera:
- *Se puede usar donde no existan bridas de tubería*
- *Menor coste que el Venturi para la misma capacidad*

Venturi:
- *Mínima pérdida de carga*
- *Tomas de presión integradas*
- *Menor tramo recto previo en el lado de entrada*
- *No se obstruye con materias en suspensión*
- *Se puede usar en tuberías sin bridas*
- *Coeficiente de descarga bien definido*

Inconvenientes de cada tipo de medidor elemental:

Orificio:
- *Elevada pérdida de altura no recuperable*
- *En tuberías horizontales, a la entrada, se acumulan materias en suspensión*
- *Baja capacidad*
- *Requiere bridas de tubería, salvo construcción especial*

Tobera:
- *Mayor coste que el orificio*
- *Igual pérdida de carga que en el orificio de la misma capacidad*
- *Las tomas de presión en cuello y entrada son muy delicadas*

Venturi:
- *Coste máximo*
- *Peso y tamaño máximos para una tubería de diámetro dado*

La tobera con tomas en el cuello para medir el caudal, es el dispositivo que tiene mayor precisión; en la Fig XXXVI.30 se presenta un orificio calibrado y una tobera aforadora, en la Fig XXXVI.31 un tubo Venturi y en la Fig XXXVI.32 dos Venturi (simétrico y asimétrico) para medir el gasto de aire comburente.

Estos elementos se calibran en laboratorio antes de utilizarlos en pruebas de precisión, en las que hay que tener presentes algunas consideraciones, como:

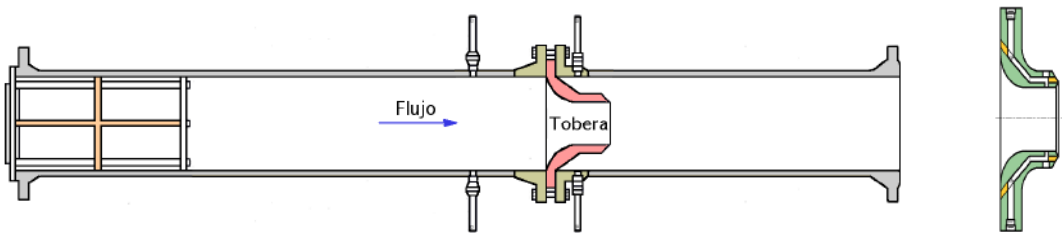

Fig XXXVI.30.- Disposición de la tobera en el tubo

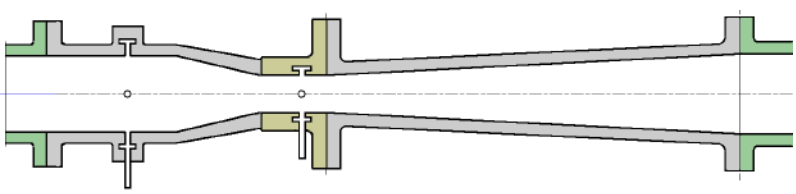

Fig XXXVI.31.- Forma de un Venturi

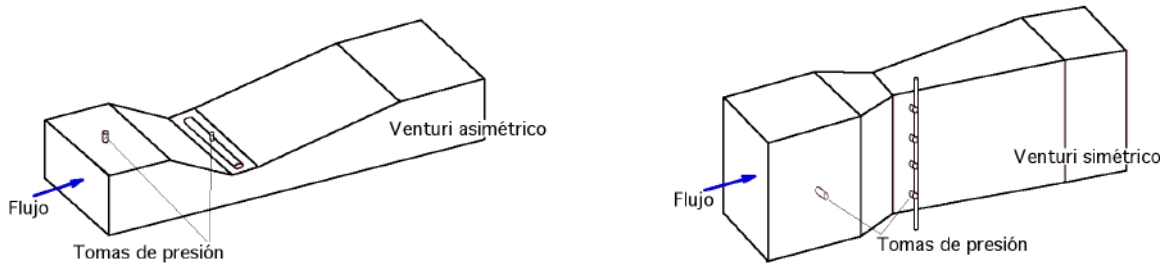

Fig XXXVI.32.- Tubos Venturi utilizados para medir el gasto de aire comburente.

- *Posicionamiento en la tubería respecto a codos y cambios de sección*
- *Posible necesidad de rectificadores de flujo*
- *Ubicación y tipo de tomas de presión*
- *Dimensiones y estado de la superficie de la tubería anterior y posterior al elemento primario*
- *Disposición de los tubos entre el primario y el instrumento de medida de presión diferencial*

Para medir el gasto de $aire_{comburente}$ y humos no se requiere un alto grado de precisión; se usan orificios, toberas o Venturis, pero no se cumplimentan las especificaciones constructivas y de ubicación por limitaciones de espacio.

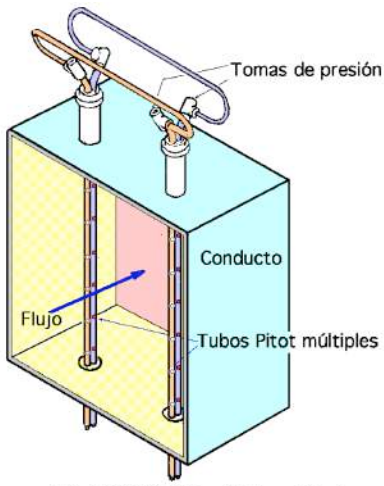

Fig XXXVI.33.- Tubos Pitot de presión dinámica a varias alturas

La Fig XXXVI.33 representa una disposición de tubos Pitot de presión dinámica, para la medida del gasto de $aire_{primario}$ en un pulverizador.

Para alcanzar una medida fiable del gasto de aire, el $aire_{primario}$ se calibra a la temperatura y presión normales de operación; para ello, las tomas de presión se ubican en zonas del conducto, en las que existan buenas características de flujo. Cuando el tubo Pitot se instala frente al flujo de aire o humos, mide la presión dinámica, diferencia entre la presión total y la estática, que se convierte en velocidad mediante la expresión:

$$v(ft/seg) = 18{,}3\sqrt{\frac{h_{vel}}{r}}$$

$$\text{en la que} \begin{cases} h_{vel} \text{ es la altura de velocidad} \\ (") \, wg \text{ (pulgadas de columna de agua) viene dada por la diferencial del tubo Pitot} \\ \rho \text{ es la densidad } (lb/ft^3) \text{ a la temperatura correspondiente a la ubicación del Pitot} \end{cases}$$

Cuando el Pitot se utiliza para leer *alturas de velocidad* tiene un coeficiente igual a la unidad, eliminando así correcciones.

La Fig XXXVI.35 muestra un método de medida que ocupa la sección recta de un conducto

circular, con las tomas de un Pitot. La sonda Fechheimer es un instrumento de medida que tiene un coeficiente igual a la unidad e incorpora un dispositivo de centrado, que permite determinar cuándo la sonda enfoca exactamente la dirección del flujo de gases Fig XXXVI.36.

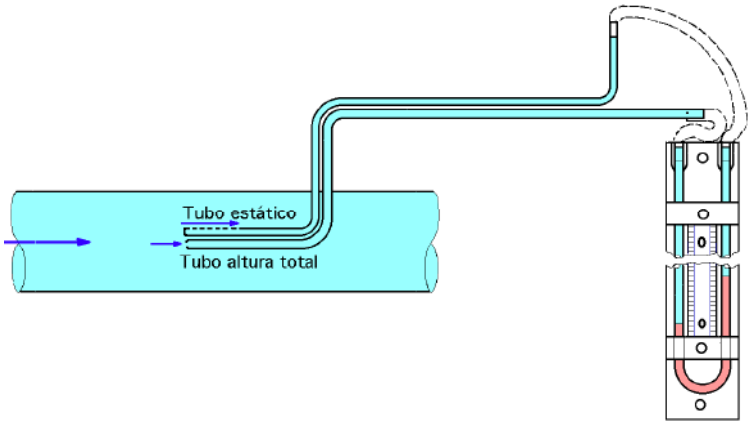

Fig XXXVI.34.- Tubo Pitot -Prandtl y manómetro de tubo de cristal en U

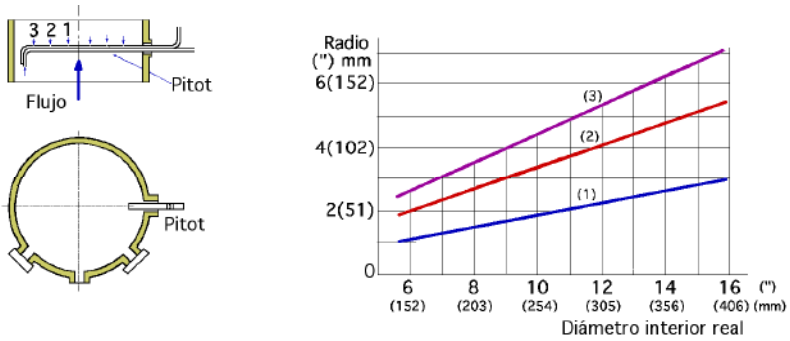

Fig XXXVI.35.- Disposición de tomas en un tubo Pitot que ocupa la sección recta de un conducto circular

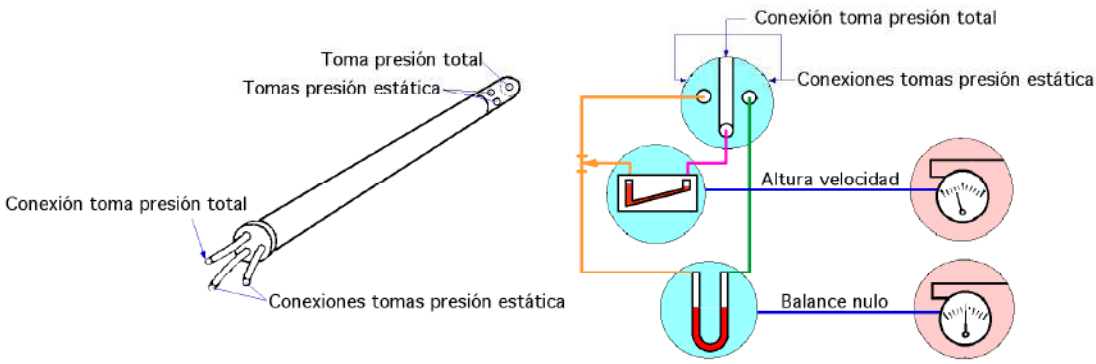

Fig XXXVI.36.- Sonda Fechheimer

- En la figura, los agujeros exteriores de la sonda están a 39,25" del taladro central, y se disponen en puntos con presión dinámica nula, facilitando la presión estática real.

- Cuando la sonda enfoca el flujo de gas, un manómetro diferencial conectado entre los dos agujeros exteriores indica un desvío nulo, o centrado equilibrado.

- Como el agujero central recibe de pleno el impacto de la corriente de gas, un manómetro conectado entre el agujero central y uno de los laterales indica la presión dinámica real, (presión de impacto menos la presión estática).

Otros aparatos para medir el flujo de gases son:

- La parrilla de tubos Pitot, que consiste en una fila de tubos Pitot dispuestos en un circuito de flujo. La señal primaria es una presión diferencial; la fila de tubos Pitot mide una serie de gastos y minimiza los errores de la medida derivados de un flujo desequilibrado y de las condiciones existentes aguas arriba.

- El anemómetro de hilo caliente mide el flujo de gases utilizando una sonda con un pequeño hilo en su extremo; el flujo que rodea el hilo extrae calor, y el gasto se mide cuando el hilo caliente mantiene en equilibrio la alimentación de energía eléctrica al medidor y la pérdida de calor.

- El efecto Doppler se aplica para la medida del gasto, mediante señales láser o acústicas que, junto con el tipo de fluido hacen que estos métodos sean de aplicaciones muy específicas.

REFERENCIAS CAP XXXVI.- CONTROL MEDIOAMBIENTAL

Liptak B.G.- INSTRUMENT ENGINEERS HANDBOOK. Chilton, Radnor, Pennsylvania, 1982

Elliot T.C.- MONITORING POLLUTION, Power, pp. 51 - 56, September 1986

Elliot T.C.- LEVEL MONITORING, Power, pp. 41-58, September, 1990.

Gilbert G.- THREE WAYS TO MEASURE FLOW IN POWER PLANT DUCTS, Power pp. 63-72, June 1987

B&W.- STEAM: ITS GENERATION AND USE , 40th ed.,, The Babcock and Wilcox Company Barberton, Ohio, USA, 1992

Rothstein F., Fisher J.E.- pH MEASUREMENT: THE METER.- American Laboratory.- 1985

Kiser J.V.L.- CONTINUOUS EMISSIONS MONITORING: A PREMIER.- Waste Age, pp. 64- 68.- 1988

Kiser J.V.L.- MORE ON CONTINUOUS EMISSIONS MONITORING.- Waste Age, pp. 119-122, June, 1988.

Pavlish J.H.- STATUS REVIEW OF MERCURY CONTROL OPTIONS FOR COAL-FIRED POWER PLANTS.- Fuel Processing Technology, 82: 89-165, pp 98-99, 2003.

Robertson R.L.- CONTINUOUS EMISSION MONITORING AND QUALITY ASSURANCE REQUIREMENTS FOR NEW POWER PLANTS.- Appearing in Continuous Emission Monitoring Systems for Power Plants: The State of the Art, American Society of Mechanical Engineers (ASME), pp. 13-15, New York, New York, 1988.

Rothstein F., Fisher J.E.- pH MEASUREMENT: THE METER.- American Laboratory, September, 1985.

Spriggs D.- CALIBRATION AND TROUBLESHOOTING OF PH LOOPS.- Presented to the American Water Works Associa- tion Ohio Section Northeast District Meeting, Painesville, Ohio, July 20, 1989.