

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

	<i>Página</i>
CAPÍTULO 2. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA	66
2.1 Generalidades	66
2.1.1 Definición	66
2.1.2 Unidades y escalas	66
2.1.3 Requisitos meteorológicos	67
2.1.3.1 Generalidades	67
2.1.3.2 Requisitos de exactitud	67
2.1.3.3 Tiempos de respuesta de los termómetros	68
2.1.3.4 Registro de las circunstancias en que se efectúan las mediciones	68
2.1.4 Métodos de medición	68
2.1.4.1 Exposición y emplazamiento	69
2.1.4.2 Patrones de temperatura	69
2.2 Termómetros de líquido en cápsulas de vidrio	70
2.2.1 Descripción general	70
2.2.1.1 Termómetros (de estación) ordinarios	71
2.2.1.2 Termómetros de máxima	71
2.2.1.3 Termómetros de mínima	71
2.2.1.4 Termómetros de suelo	72
2.2.2 Procedimientos de medición	72
2.2.2.1 Lectura de termómetros ordinarios	72
2.2.2.2 Medición de temperaturas mínimas de la hierba	73
2.2.2.3 Medición de las temperaturas del suelo	73
2.2.3 Exposición y emplazamiento	73
2.2.4 Fuentes de error	74
2.2.4.1 Errores elásticos	74
2.2.4.2 Errores causados por el tubo saliente	74
2.2.4.3 Errores de paralaje y errores de lectura ostensibles	75
2.2.4.4 Errores debidos a diferencias de dilatación	75
2.2.4.5 Errores asociados a los termómetros de alcohol	75
2.2.5 Comparación y calibración	76
2.2.5.1 Calibración en laboratorio	76
2.2.5.2 Comprobaciones y calibración en condiciones reales	76
2.2.6 Correcciones	77
2.2.7 Mantenimiento	77
2.2.7.1 Rotura de la columna de líquido	77
2.2.7.2 Ilegibilidad de la escala	78
2.2.8 Seguridad	78
2.3 Termógrafos mecánicos	78
2.3.1 Descripción general	78
2.3.1.1 Termógrafo bimetalico	78
2.3.1.2 Termógrafo de tubo de Bourdon	79
2.3.2 Procedimientos de medición	79
2.3.3 Exposición y emplazamiento	79
2.3.4 Fuentes de error	79
2.3.5 Comparación y calibración	79
2.3.5.1 Calibración en laboratorio	79
2.3.5.2 Comparación en condiciones reales	80
2.3.6 Correcciones	80
2.3.7 Mantenimiento	80
2.4 Termómetros eléctricos	80
2.4.1 Descripción general	80
2.4.1.1 Termómetros de resistencia eléctrica	80
2.4.1.2 Termómetros de semiconductor	81
2.4.1.3 Termopares	82
2.4.2 Procedimientos de medición	83
2.4.2.1 Termómetros de resistencia eléctrica	83
2.4.2.2 Termopares	83
2.4.3 Exposición y emplazamiento	84

	<i>Página</i>
2.4.4 Fuentes de error	84
2.4.4.1 Termómetros de resistencia eléctrica	84
2.4.4.2 Termopares	85
2.4.5 Comparación y calibración	85
2.4.5.1 Termómetros de resistencia eléctrica	85
2.4.5.2 Termopares	86
2.4.6 Correcciones	86
2.4.7 Mantenimiento	86
2.5 Protección contra las radiaciones	86
2.5.1 Garitas de persiana	87
2.5.2 Otras protecciones ventiladas artificialmente	88
ANEXO. DETERMINACIÓN DE LOS PUNTOS FIJOS DE LA ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1990	90
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	92

CAPÍTULO 2. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA

2.1 GENERALIDADES

2.1.1 Definición

La Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1992) define la temperatura como la magnitud física que caracteriza el movimiento aleatorio medio de las moléculas en un cuerpo físico. Cuando dos cuerpos están en contacto térmico terminan teniendo la misma temperatura, siendo este uno de los comportamientos característicos de la temperatura. Por lo tanto, la temperatura representa el estado termodinámico de un cuerpo y su valor está determinado por la dirección del flujo neto de calor entre dos cuerpos. En un sistema de este tipo, se dice que el cuerpo que pierde calor globalmente en favor del otro, se encuentra a mayor temperatura. Sin embargo, resulta difícil definir la magnitud física de la temperatura con respecto al “estado de un cuerpo”. La solución que se ha encontrado consiste en definir una escala de temperaturas aprobada internacionalmente basada en puntos de congelación y en puntos triples universales¹. La escala que se está aplicando actualmente es la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90)², en la que la temperatura se expresa en t_{90} (temperatura Celsius) o en T_{90} (temperatura kelvin). Para el rango de valores meteorológicos (-95 °C a $+60\text{ °C}$), t_{90} está definida por medio de un conjunto bien especificado de termómetros de resistencia de platino calibrados en una serie de puntos fijos que se determinan y la aplicación de procedimientos especificados de interpolación (BIPM, 1989 y 1990).

Para fines meteorológicos se miden las temperaturas de numerosos medios. La variable más comúnmente medida es la temperatura del aire (a diversas alturas). Otras variables son la temperatura mínima de la hierba, la del terreno, la del suelo y la temperatura del agua de mar. La OMM (1992) define la temperatura del aire como “la temperatura leída en un termómetro expuesto al aire, protegido de la radiación solar directa”. Aunque esta definición no se pueda utilizar como definición de la magnitud termodinámica propiamente dicha, sirve para la mayoría de las aplicaciones.

2.1.2 Unidades y escalas

La temperatura termodinámica (T), expresada en kelvines (K), también conocida como “temperatura kelvin”, es la temperatura básica. Un kelvin equivale a $1/273,16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua. En meteorología se utiliza casi siempre la temperatura (t) en grados Celsius (o “temperatura Celsius”), definida por la ecuación 2.1 (a partir de la referencia secundaria del punto de congelación del cuadro 2.A.2 del anexo):

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15 \quad (2.1)$$

Una diferencia de temperatura de un grado Celsius ($^{\circ}\text{C}$) es igual a un kelvin (K). Cabe señalar que la unidad K se utiliza sin el símbolo de grado.

En la escala termodinámica de temperaturas, las mediciones se expresan como diferencias respecto del cero absoluto (0 K), que es la temperatura a la cual las moléculas de cualquier sustancia carecen de energía cinética. La escala de temperaturas generalmente utilizada desde 1990 es la EIT-90 (véase el anexo), basada en determinados valores de temperatura asignados a ciertos estados de equilibrio reproducibles (véase el cuadro 2.A.1 del anexo), y en determinados instrumentos patrón calibrados a esas temperaturas. La EIT se definió de tal manera que la temperatura medida en esta escala coincide con la temperatura termodinámica, y cualquier diferencia está dentro de los márgenes de incertidumbre de las mediciones. Además de

¹ El órgano autorizado en lo referente a esta escala es la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), Sèvres (París); véase <http://www.bipm.org>. El Comité Consultivo de Termometría de la BIPM es el órgano ejecutivo encargado de establecer y aplicar la Escala Internacional de Temperatura.

² Se puede consultar información práctica sobre la EIT-90 en su propio sitio web: <http://www.its-90.com>.

determinar los puntos fijos de esta escala, existen también otros puntos de referencia secundarios (véase el cuadro 2.A.2 del anexo). Las temperaturas de interés meteorológico se obtienen mediante la interpolación entre los puntos fijos, aplicando las fórmulas normalizadas que figuran en el anexo.

2.1.3 **Requisitos meteorológicos**

2.1.3.1 **Generalidades**

Los requisitos meteorológicos para las mediciones de temperatura en meteorología están relacionados principalmente con:

- a) el aire cerca de la superficie de la Tierra;
- b) la superficie del terreno;
- c) el suelo a diversas profundidades;
- d) los niveles de superficie del mar y de los lagos;
- e) la atmósfera superior.

Estas mediciones son necesarias, conjuntamente o por separado, y a escala local o mundial, para introducir datos en los modelos de predicción numérica del tiempo, para fines hidrológicos y agrícolas, y como indicadores de la variabilidad del clima. La temperatura local tiene también importancia fisiológica para las actividades cotidianas de la población mundial. Las mediciones de temperatura pueden necesitarse en forma de registros continuos, o pueden obtenerse a intervalos de tiempo diferentes. En este capítulo se examinan los requisitos relacionados con los apartados a), b) y c).

2.1.3.2 **Requisitos de exactitud**

El intervalo de valores, el grado de resolución de la información y la incertidumbre requeridos en las mediciones de temperatura aparecen detallados en el capítulo 1 de la parte I de esta Guía. En la práctica, puede no resultar económico proporcionar termómetros que cumplan directamente las condiciones requeridas. En cambio, se utilizan termómetros menos costosos, calibrados con arreglo a un patrón de laboratorio, introduciendo las correcciones necesarias en las lecturas obtenidas. Es preciso limitar la magnitud de las correcciones, a fin de mantener dentro de un margen los errores residuales. Los valores de funcionamiento del termómetro se escogerán, asimismo, de modo que reflejen el margen de variación del clima local. A título de ejemplo, en el cuadro siguiente figura un intervalo aceptable de valores de calibración y de error para termómetros que abarcan una escala de medición típica.

Ejemplo de posibles características de los termómetros

<i>Tipo de termómetro</i>	<i>Ordinario</i>	<i>Máxima</i>	<i>Mínima</i>
Ámbito de la escala (°C)	-30 a 45	-30 a 50	-40 a 40
Intervalo de calibración (°C)	-30 a 40	-25 a 40	-30 a 30
Error máximo (K)	< 0,2	0,2	0,3
Diferencia máxima entre corrección máxima y mínima dentro de la escala (K)	0,2	0,3	0,5
Variación máxima de la corrección en cualquier intervalo de 10 °C (K)	0,1	0,1	0,1

Todos los instrumentos de medición de temperatura deberían entregarse con un certificado que confirme el cumplimiento de las especificaciones adecuadas en cuanto a incertidumbre de las mediciones o a prestaciones del instrumento, o bien con un certificado de calibración que indique las correcciones que hay que aplicar para obtener la incertidumbre de medición requerida. Esta comprobación y calibración iniciales deberían ser realizadas por un laboratorio de calibración acreditado. Posteriormente, también deberían verificarse los instrumentos de medición de temperatura a intervalos regulares, utilizando para ello un patrón adecuado según el instrumento o sensor a calibrar.

2.1.3.3 ***Tiempos de respuesta de los termómetros***

Para las observaciones meteorológicas ordinarias no hay ventaja alguna en utilizar termómetros con una constante de tiempo o con un coeficiente de retardo muy pequeños, ya que la temperatura del aire fluctúa constantemente hasta en uno o dos grados en pocos segundos. Por eso, para obtener una lectura representativa con este tipo de termómetros habría que calcular la media de varias lecturas, en tanto que los termómetros con una constante de tiempo mayor tienden a suavizar las fluctuaciones rápidas. Sin embargo, una constante de tiempo demasiado grande puede dar lugar a errores si los cambios de temperatura duran períodos largos. Se recomienda que la constante de tiempo, definida como el tiempo necesario para que el termómetro registre el 63,2% de un cambio discreto de la temperatura del aire, sea de 20 segundos. La constante de tiempo depende del flujo de aire sobre el sensor.

2.1.3.4 ***Registro de las circunstancias en que se efectúan las mediciones***

La temperatura es uno de los parámetros meteorológicos cuya medición es muy sensible a la exposición. Para los estudios sobre el clima en particular, las mediciones de temperatura resultan afectadas por el estado del entorno circundante, la vegetación, la presencia de edificios u otros objetos, la cubierta del suelo, el estado y las diferencias de diseño del escudo o de la pantalla contra las radiaciones, y otros cambios en el equipo (OMM, 2011). Por consiguiente, es importante llevar registros no solo de los datos de temperatura, sino también de las circunstancias en que se han realizado las mediciones. Esta información se conoce como metadatos (datos acerca de datos; véase el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.C)).

2.1.4 **Métodos de medición**

Una forma de medir la temperatura de un objeto consiste en dejar que el termómetro alcance la temperatura del objeto (es decir, ponerlo en equilibrio termodinámico con este), y efectuar entonces la medición de la temperatura de dicho termómetro. También se puede determinar la temperatura mediante un radiómetro, sin necesidad de alcanzar un equilibrio térmico.

Toda propiedad física de una sustancia que sea función de la temperatura puede servir de base para construir un termómetro. Las propiedades utilizadas generalmente en los termómetros meteorológicos son la dilatación térmica y la variación de la resistencia eléctrica con la temperatura. Los termómetros radiométricos operan en la banda infrarroja del espectro electromagnético y se utilizan, entre otras aplicaciones, para medir la temperatura desde satélites. Existe una técnica especial para determinar la temperatura del aire utilizando muestreo ultrasónico que ha sido diseñado con objeto de determinar la velocidad del aire y que, además, proporciona la velocidad media de las moléculas de aire y, por consiguiente, su temperatura (OMM, 2002a).

Los termómetros que indican la temperatura ambiente suelen denominarse termómetros ordinarios, y los que indican las temperaturas extremas a lo largo de un período de tiempo se denominan termómetros de máxima o de mínima.

Existen varios textos de uso corriente sobre el diseño de instrumentos y prácticas de laboratorio para la medición de temperatura, por ejemplo, Jones (1992) y Middleton y Spilhaus (1960).

Teniendo en cuenta los conceptos de la termometría, cuando se trate de aplicaciones meteorológicas, habría que tratar de utilizar únicamente tecnologías específicas a causa de las limitaciones impuestas por las características del clima o del medio ambiente.

2.1.4.1 **Exposición y emplazamiento**

La radiación del sol, las nubes, el suelo y otros objetos circundantes atraviesa el aire sin modificar apreciablemente su temperatura, pero un termómetro expuesto al aire libre puede absorber una cantidad de radiación considerable. En consecuencia, su temperatura puede diferir de la temperatura verdadera del aire en una magnitud que dependerá de la intensidad de la radiación y del cociente entre la radiación absorbida y el calor disipado. Para algunos elementos de estos termómetros, como el finísimo alambre de los termómetros de resistencia de hilo descubierto, la diferencia de temperatura puede ser muy pequeña o incluso insignificante, pero con los utilizados más habitualmente la diferencia de temperatura puede alcanzar los 25 K en condiciones extremadamente desfavorables. Así pues, para asegurarse de que el termómetro esté a la temperatura verdadera del aire es necesario protegerlo de la radiación mediante una garita o protección que le sirva a la vez de soporte. Esta garita lo protegerá también de las precipitaciones, permitirá al aire circular libremente a su alrededor e impedirá que se dañe accidentalmente. Dependiendo de las corrientes de aire locales, las precipitaciones sobre el sensor bajarán las temperaturas del mismo, haciendo que este funcione como un termómetro húmedo. No obstante, la circulación de aire puede verse obstaculizada cuando se forma escarcha. Hay diversas maneras de reducir los errores de observación en tales circunstancias, entre ellas el diseño especial de las garitas o de los instrumentos de medición de la temperatura integrando, por ejemplo, ventilación artificial. Sin embargo, en el caso de la ventilación artificial, se debería evitar cuidadosamente la influencia impredecible de la combinación de deposiciones húmedas y evaporación durante los episodios de precipitaciones, lloviznas, niebla y similares. En Sparks (1970) se facilita información general sobre conceptos de mediciones de temperaturas aplicables en prácticas operativas.

A fin de obtener resultados representativos cuando se comparan las lecturas termométricas de lugares y momentos diferentes, es también indispensable normalizar la exposición de la garita y, por consiguiente, del termómetro propiamente dicho. En las actividades meteorológicas habituales, la temperatura del aire observada debería ser representativa del estado del aire que rodea la estación en un área lo más extensa posible, y a una altura de entre 1,25 y 2 m por encima del nivel del suelo. Este último dato se especifica porque en las capas más bajas de la atmósfera pueden darse importantes gradientes verticales de temperatura. El mejor lugar para realizar las mediciones es, pues, por encima del nivel del suelo, con exposición directa al sol y al viento, y libre de la sombra o proximidad de árboles, edificios u otros objetos que obstruyan. Las pendientes muy inclinadas y las depresiones del terreno están expuestas a condiciones excepcionales, por lo que convendría evitarlas. En los pueblos y ciudades, las características locales suelen ser más marcadas que en las zonas rurales. Las observaciones de temperatura en las cimas de los edificios son de dudoso valor y utilidad, debido al gradiente vertical variable de temperatura que existe en esos lugares y al efecto del propio edificio sobre la distribución de la temperatura.

En la clasificación de emplazamientos de las estaciones terrestres de observación en superficie (véase el capítulo 1 de la parte I (anexo 1.B) de la presente Guía) se proporcionan más orientaciones sobre la selección de un emplazamiento y la ubicación de un termómetro en un emplazamiento a los fines de optimizar la representatividad.

2.1.4.2 **Patrones de temperatura**

Patrones de laboratorio

Los laboratorios nacionales de patrones tendrán y mantendrán termómetros patrón primarios. Un laboratorio meteorológico nacional u otro laboratorio de calibración acreditado tendrán como patrón de trabajo un termómetro de resistencia de platino de gran pureza, trazado al

patrón nacional. La incertidumbre de este termómetro podrá ser verificada periódicamente en una célula de punto triple del agua. El punto triple del agua está exactamente definido y puede ser reproducido en una célula de punto triple con una incertidumbre de $1 \cdot 10^{-4}$ K.

Patrones de campo

El psicrómetro de referencia de la OMM (OMM, 1992) es el instrumento de referencia para determinar la relación entre la temperatura del aire, medida con instrumentos de superficie convencionales, y la temperatura verdadera del aire. Este instrumento ha sido diseñado como aparato autónomo y no necesita garita ni protección; es el más exacto de que se dispone para evaluar y comparar sistemas de instrumentos. No está concebido para ser utilizado en las actividades cotidianas de meteorología y permite medir temperaturas con una incertidumbre de 0,04 K (con un nivel de confianza del 95%). El capítulo 4 de la parte I contiene más información al respecto.

2.2 TERMÓMETROS DE LÍQUIDO EN CÁPSULAS DE VIDRIO

2.2.1 Descripción general

Para las observaciones de rutina de la temperatura del aire, incluidas las correspondientes a las temperaturas máxima, mínima y del termómetro húmedo, se utilizan todavía habitualmente termómetros de líquido en cápsula de vidrio. Estos termómetros indican la temperatura mediante la dilatación relativa de un líquido puro con respecto al vidrio que lo contiene. El tubo tiene una delgada perforación conectada al bulbo principal; el volumen del líquido en el termómetro es tal que el bulbo se encuentra completamente lleno, mientras que el tubo solo lo está parcialmente para todas las temperaturas a medir. Los cambios de volumen del líquido respecto de su recipiente se traducirán en cambios en la columna líquida; calibrando el instrumento mediante un termómetro patrón, será posible marcar una escala de temperatura sobre el tubo o sobre un soporte firmemente unido a aquel.

El líquido que se emplea depende del intervalo de temperaturas que se requiera; se suele utilizar el mercurio³, para temperaturas superiores a su punto de congelación ($-38,9$ °C), o bien el alcohol etílico u otros líquidos orgánicos puros para temperaturas más bajas. El vidrio debería ser normal o borosilicatado, del tipo aprobado para su uso en termómetros. El diseño del bulbo es delgado pero suficientemente resistente para facilitar la conducción de calor hacia y desde el bulbo y su contenido. Una perforación más estrecha facilita el movimiento del líquido en el tubo para un cambio de temperatura dado, pero reduce el intervalo útil de temperatura del termómetro para una longitud determinada del tubo. Antes de graduarlo, el termómetro debería templarse adecuadamente, a fin de atenuar los cambios lentos que se producen en el vidrio por efecto del envejecimiento.

La construcción de los termómetros meteorológicos responde a cuatro tipos principales:

- a) revestidos, con la escala grabada en el tubo del termómetro;
- b) revestidos, con la escala grabada en una tira de vidrio opalino fijada al tubo del termómetro en el interior del receptáculo;
- c) sin revestimiento, con la graduación marcada en el tubo y montado sobre un soporte de metal, porcelana o madera donde figuran los números de la escala;
- d) sin revestimiento, con la escala grabada sobre el tubo.

³ En el capítulo 3 de la parte I (sección 3.2.7), se proporcionan consejos sobre la utilización sin riesgos del mercurio. El Convenio de Minamata sobre el Mercurio del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente entró en vigor en octubre de 2013 y repercutirá significativamente en la utilización del mercurio para aplicaciones meteorológicas.

En algunos termómetros el vidrio del tubo forma una lente en su parte frontal para ofrecer una imagen aumentada de la columna de mercurio.

Los tipos a) y b) presentan, frente a los tipos c) y d), la ventaja de que las marcas de su escala están protegidas de la intemperie. En los dos últimos tipos es necesario volver a ennegrecer las marcas del termómetro de cuando en cuando; por otra parte, son más fáciles de construir que los de tipo a) y b). Los tipos a) y d) tienen la ventaja de ser menos propensos a los errores de paralaje (véase la sección 2.2.4). En Oficina de Publicaciones de Su Majestad (1980) figura información general sobre termómetros diseñados para ser utilizados en prácticas meteorológicas.

Sea cual sea el tipo que se adopte, ni el revestimiento ni la montura deberían ser demasiado voluminosos, ya que ello supondría una capacidad calorífica muy elevada. Al mismo tiempo, deberían ser suficientemente robustos para no resultar dañados durante las manipulaciones o el transporte.

Para los termómetros de mercurio en cápsula de vidrio, especialmente los de máxima, es importante que el vacío que queda por encima de la columna de mercurio sea casi perfecto. Todos los termómetros deberían estar graduados para una inmersión total, excepto los que miden la temperatura del suelo. A continuación se exponen, en los apartados correspondientes, los requisitos especiales que deberían reunir los termómetros, según su finalidad.

2.2.1.1 **Termómetros (de estación) ordinarios**

Estos termómetros son los más exactos de todos los de uso meteorológico. Generalmente son del tipo de mercurio en cápsula de vidrio. Las marcas de su escala están a intervalos de 0,2 K o 0,5 K, y la escala es más amplia que la de los demás termómetros meteorológicos.

El termómetro ordinario se utiliza cubierto por una garita, para evitar errores debidos a la radiación. Un soporte lo mantiene en posición vertical, con el bulbo en el extremo inferior. El bulbo es o bien cilíndrico, o en forma de cebolla.

Un par de termómetros ordinarios puede ser utilizado como psicrómetro si uno de ellos está equipado con una vaina de bulbo húmedo⁴.

2.2.1.2 **Termómetros de máxima**

El tipo de termómetro de máxima recomendado es el de mercurio en cápsula de vidrio, con un estrechamiento entre el bulbo y el comienzo de la escala. Dicho estrechamiento impide que la columna de mercurio descienda aunque disminuya la temperatura. Sin embargo, el observador puede "reajustar" el termómetro sujetando firmemente el extremo del bulbo hacia abajo y sacudiendo a continuación el brazo hasta que la columna de mercurio se reunifique. Los termómetros de máxima deberían estar montados a un ángulo de unos 2° respecto de la horizontal, con el bulbo en el extremo inferior para que la columna de mercurio se apoye en el estrechamiento sin que la gravedad le obligue a atravesarlo. Es conveniente que la perforación se ensanche en el extremo superior del tubo, para que las partes de la columna que hayan quedado separadas se puedan unir fácilmente.

2.2.1.3 **Termómetros de mínima**

En lo que se refiere a los termómetros de mínima, el instrumento más habitual es un termómetro de alcohol con un índice de vidrio oscuro, de unos 2 cm de longitud, sumergido en el alcohol. En el tubo de estos termómetros hay siempre algo de aire, por lo que conviene dotarlos de una cámara de seguridad en su extremo superior, de un tamaño suficiente para que el instrumento pueda soportar una temperatura de 50 °C sin sufrir daños. Los termómetros de mínima deberían estar sustentados de manera análoga a los termómetros de máxima, en posición casi horizontal.

⁴ Las temperaturas registradas con termómetros de bulbo húmedo se explican en el capítulo 4 de la parte I.

Los termómetros de mínima pueden utilizar diversos tipos de líquidos como, por ejemplo, el alcohol etílico, el pentano o el tolueno. Es importante que el líquido sea lo más puro posible, ya que la presencia de ciertas impurezas aumenta la tendencia del líquido a polimerizarse bajo los efectos de la luz y con el paso del tiempo; la polimerización modifica los resultados de la calibración. En el caso del alcohol etílico, por ejemplo, el alcohol debería estar completamente libre de acetona.

Los termómetros de mínima se utilizan también para obtener la temperatura mínima de la hierba.

2.2.1.4 **Termómetros de suelo**

Para medir las temperaturas del suelo a profundidades iguales o inferiores a 20 cm se utilizan habitualmente termómetros de mercurio en cápsulas de vidrio cuyos tubos forman un ángulo recto u otro ángulo apropiado por debajo de la graduación más baja. El bulbo del termómetro se inserta en el suelo hasta la profundidad requerida, y la lectura de la escala se hace con el termómetro *in situ*. Estos termómetros están graduados para ser introducidos hasta la profundidad de medición. Como el resto del instrumento se mantiene a la temperatura del aire, debería haber en el extremo del tubo una cámara de seguridad que permita la expansión del mercurio.

Para medir temperaturas a profundidades superiores a 20 cm se recomienda usar termómetros de mercurio en cápsula de vidrio montados sobre tubos de madera, vidrio o plástico, con los bulbos recubiertos de cera o de pintura metálica. El conjunto termómetro/tubo se suspende o se introduce entonces en tubos de metal o de plástico de paredes delgadas, previamente hundidos en el suelo hasta la profundidad requerida. En climas fríos, el extremo superior del tubo externo debería sobresalir del suelo hasta una altura superior a la de la cubierta de nieve que se espere tener.

La técnica consistente en utilizar tubos verticales de acero no es adecuada para medir la variación diurna de la temperatura del suelo, particularmente en suelos secos, y los cálculos de las propiedades térmicas del suelo basados en esas mediciones podrían tener un margen de error importante a causa de la influencia del calor de la capa de superficie.

El alto valor de la constante de tiempo, como consecuencia de una mayor capacidad calorífica, permite extraer estos termómetros del tubo externo y efectuar la lectura antes de que la temperatura varíe apreciablemente respecto de la temperatura del suelo.

Cuando el suelo esté cubierto de nieve, para que el observador pueda acercarse a la línea de termómetros sin alterar la cubierta de nieve, se recomienda construir una pasarela de poco peso paralela a dicha línea. Esta pasarela debería estar diseñada de manera que su parte superior se pudiera desmontar entre una serie de lecturas y la siguiente sin alterar la cubierta de nieve.

2.2.2 **Procedimientos de medición**

2.2.2.1 **Lectura de termómetros ordinarios**

La lectura de los termómetros debería hacerse lo más rápidamente posible, a fin de evitar cambios de temperatura imputables a la presencia del observador. Dado que el menisco, o índice, de líquido y la escala del termómetro no están en un mismo plano, habrá que tener cuidado para evitar los errores de paralaje. Para no incurrir en estos errores, el observador deberá cerciorarse de que la línea recta definida por su ojo y el menisco o índice formen un ángulo recto con el tubo del termómetro. Como las escalas de los termómetros no contienen, por lo general, subdivisiones inferiores a la quinta parte de un grado, las lecturas redondeadas a la décima de grado más próxima, que son esenciales en psicrometría, deberán hacerse por estimación. Las correcciones por errores de escala, si las hay, deberían aplicarse a las lecturas. La lectura y puesta

en estación de los termómetros de máxima y de mínima tendrían que efectuarse al menos dos veces al día y se deberían comparar con frecuencia estas lecturas con las de un termómetro ordinario para asegurarse de que no haya errores importantes.

2.2.2.2 **Medición de temperaturas mínimas de la hierba**

La temperatura mínima de la hierba es la temperatura más baja alcanzada a lo largo de una noche por un termómetro expuesto al aire libre sobre la hierba corta. Esta temperatura se mide con un termómetro de mínima como el que se describe en la sección 2.2.1.3. El termómetro debería estar montado sobre un soporte adecuado que lo sustente con una inclinación de unos 2° respecto de la horizontal, con el bulbo a menor altura que el tubo, entre 25 y 50 mm por encima del suelo, y en contacto con las puntas de la hierba. Cuando el suelo esté cubierto de nieve, el termómetro debería estar situado inmediatamente por encima de la superficie de la nieve, lo más cerca posible de esta sin llegar a tocarla.

Normalmente, el termómetro se expone a la última hora de observación antes de la puesta del sol, y la lectura se realiza a la mañana siguiente. Durante el día, el instrumento se guarda protegido por una garita, o en un lugar cerrado. No obstante, en las estaciones que no cuentan con ningún observador a la puesta del sol podría ser necesario dejar el termómetro expuesto durante todo el día. En caso de un sol intenso, el alcohol del instrumento podría evaporarse y condensarse en la parte superior del tubo. Puede reducirse este efecto colocando una pantalla metálica negra revestida de una funda de algodón sobre el extremo del termómetro que contiene la cámara de seguridad; esta pantalla absorbe más radiación y alcanza, por consiguiente, una temperatura mayor que el resto del instrumento. De ese modo, si se forma vapor, este se condensará en un punto del tubo, por debajo del extremo superior de la columna de alcohol.

2.2.2.3 **Medición de las temperaturas del suelo**

Las profundidades típicas para las mediciones de temperatura del suelo son 5, 10, 20, 50 y 100 cm por debajo de la superficie, si bien es posible realizarlas también a otras profundidades. El lugar de medición debería ser una porción de terreno llano y despejado, de unos 75 cm^2 , representativa del suelo circundante del que se deseen tomar datos. Si la superficie no fuera representativa de los alrededores, su extensión no debería ser inferior a 100 m^2 . Cuando el suelo esté cubierto de nieve, es conveniente medir también la temperatura de la cubierta de nieve. Si no hay demasiada nieve, se puede apartar del suelo antes de efectuar las lecturas, y colocarla después de nuevo en su lugar.

Al describir un emplazamiento para medir la temperatura del suelo, se debería anotar el tipo de suelo, la cubierta de suelo y el grado y la dirección de la pendiente del terreno. Siempre que sea posible, se deberían indicar las constantes físicas del suelo, tales como la densidad aparente, la conductividad térmica o el contenido de humedad a la capacidad de campo. Además, se deberían incluir el nivel de la capa freática (si no estuviera a más de 5 m de la superficie) y la estructura del suelo.

En las estaciones agrometeorológicas es conveniente realizar el registro continuo de las temperaturas del suelo y del aire a diferentes niveles en la capa adyacente al suelo (desde el nivel del suelo hasta unos 10 m por encima del límite superior de la vegetación predominante).

2.2.3 **Exposición y emplazamiento**

Tanto los termómetros ordinarios como los de máxima y mínima se usan siempre protegidos por una garita instalada sobre un soporte. Los termómetros de extremas van montados sobre soportes adecuados que los mantienen en un ángulo de unos 2° respecto de la horizontal, con el bulbo a menor altura que el tubo.

El termómetro de mínimas de la hierba se coloca y se expone en el lugar de medición tal y como se indica en la sección 2.2.2.2. En una estación en que la nieve sea persistente y de profundidad variable, puede utilizarse un soporte que permita subir o bajar el termómetro a fin de mantener la altura correcta por encima de la superficie de la nieve.

2.2.4 Fuentes de error

Los errores más comunes en los termómetros de líquido en cápsula de vidrio son:

- a) errores elásticos;
- b) errores causados por el tubo saliente;
- c) errores de paralaje y errores de lectura ostensibles;
- d) cambios en el volumen del bulbo producidos por la presión externa o interna;
- e) capilaridad;
- f) errores de división de la escala y de calibración;
- g) dilatación desigual del líquido y del vidrio en el rango considerado.

Los tres últimos tipos de errores pueden minimizarse en el proceso de fabricación, e incluirse entre las correcciones que se aplicarán a los valores observados. Los tres primeros merecen cierta consideración. Los errores de tipo d) no suelen producirse cuando los termómetros se utilizan para fines meteorológicos.

2.2.4.1 Errores elásticos

Existen dos tipos de errores elásticos: reversibles e irreversibles. El primero solo reviste importancia cuando se expone un termómetro a un amplio intervalo de temperatura en un corto período de tiempo. Así, si se observa la lectura de un termómetro en el punto de ebullición y, poco después, en el punto de congelación, la temperatura indicada será un poco baja al principio, y luego aumentará lentamente hasta alcanzar el valor correcto. Este error depende de la calidad del vidrio empleado en el termómetro, y puede llegar a ser de 1 K (con vidrio de la mejor calidad no pasaría de 0,03 K) y sería proporcionalmente menor para intervalos de temperatura más reducidos. Este efecto carece de importancia en las mediciones meteorológicas, si se descarta la posibilidad de un error en la calibración original.

Los cambios irreversibles pueden tener mayor relevancia. El bulbo del termómetro tiende a contraerse lentamente a lo largo de los años, haciendo con ello que el nivel cero aumente. El mayor cambio tendrá lugar durante el primer año, y a partir de entonces el ritmo de variación disminuirá progresivamente. Esta alteración puede reducirse sometiendo el bulbo a tratamiento térmico y utilizando el vidrio más adecuado. Incluso, con el vidrio de mejor calidad, este cambio podría ser al principio de 0,01 K al año. Para que las mediciones sean precisas, especialmente con los termómetros de inspección o de comprobación, se debería volver a determinar el cero periódicamente, y aplicar las correcciones adecuadas.

2.2.4.2 Errores causados por el tubo saliente

Por lo general, los termómetros utilizados para medir la temperatura del aire están completamente rodeados de aire a una temperatura más o menos uniforme, y se calibran sumergiéndolos completamente, o solo hasta el punto más alto de la columna de mercurio (es decir, se los calibra por inmersión total o parcial). Cuando se utiliza uno de estos termómetros para determinar la temperatura de un medio físico que no rodea el tubo, de manera que la temperatura efectiva de este sea distinta de la del bulbo, se obtendrá un error.

En las aplicaciones meteorológicas, lo más probable es que esto ocurra al comprobar la calibración de un termómetro ordinario en un recipiente que contenga otro líquido a una temperatura apreciablemente diferente de la del ambiente, y en el que solo esté sumergido el bulbo o la parte inferior del tubo.

2.2.4.3 **Errores de paralaje y errores de lectura ostensibles**

Si el termómetro no se observa a la altura del plano perpendicular al tubo que pasa por el punto más alto de la columna del líquido, se obtendrán errores de paralaje. El error será mayor cuanto más grueso sea el tubo del termómetro y cuanto mayor sea el ángulo entre la línea de observación efectiva y la correcta. Este error solo puede evitarse extremando la precaución en el momento de la observación. Si el termómetro es de mercurio en cápsula de vidrio y está suspendido verticalmente, como en una garita corriente, la lectura deberá efectuarse en el plano horizontal que pasa por el punto más alto de la columna de mercurio.

También pueden producirse errores debido a que, al aproximarse para realizar la lectura, el observador generalmente altera de algún modo el medio circundante. Así pues, es necesario que el observador efectúe la lectura lo más rápido posible, redondeada a la décima de grado más próxima. Los errores de lectura ostensibles suelen tener una magnitud de 1° , 5° o 10° y se pueden evitar si el observador verifica por segunda vez las decenas y unidades del valor medido después de realizar la lectura inicial.

2.2.4.4 **Errores debidos a diferencias de dilatación**

El coeficiente de dilatación cúbica del mercurio es de $1,82 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, y el de la mayoría de los vidrios está comprendido entre $1,0 \cdot 10^{-5}$ y $3,0 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. El coeficiente de dilatación del vidrio es, pues, una fracción importante del coeficiente de dilatación del mercurio, y no es posible ignorarlo. Dado que ni los coeficientes de dilatación cúbica del mercurio y del vidrio, ni la sección transversal de la perforación del tubo, son estrictamente constantes en todo el intervalo de temperaturas y en toda la longitud del tubo que se utilice, el valor unitario de la escala variará a lo largo del tubo, por lo que, antes de utilizarlo, el termómetro debe ser calibrado por el fabricante con respecto a un termómetro patrón.

2.2.4.5 **Errores asociados a los termómetros de alcohol**

Los coeficientes de dilatación de los líquidos utilizados en los termómetros de alcohol son mucho mayores que los del mercurio, y sus puntos de congelación, mucho más bajos (el alcohol etílico se congela a -115°C). En los termómetros de mínima se utiliza el alcohol porque es incoloro, y porque su mayor coeficiente de dilatación permite utilizar una perforación mayor. Los termómetros de este tipo son menos precisos que los de mercurio de igual precio y calidad. Además de las desventajas que generalmente presentan los termómetros de líquido en cápsulas de vidrio, los termómetros de alcohol tienen algunas peculiaridades propias:

- a) Adherencia del alcohol al vidrio: a diferencia del mercurio, los líquidos orgánicos suelen mojar el vidrio, con lo cual, cuando la temperatura cae rápidamente, cierta cantidad de líquido puede quedar en las paredes de la perforación, haciendo que la lectura del termómetro sea más baja. Si el instrumento está suspendido verticalmente, el líquido irá escurriendo gradualmente hacia abajo.
- b) Rotura de la columna de líquido: en la parte superior del tubo del termómetro se suelen formar gotas de líquido por evaporación y condensación. Aunque estas gotas pueden llegar a reunirse con la columna principal, podrían producirse errores al comienzo del proceso, antes de que el fenómeno sea perceptible. La columna se rompe también a veces durante el transporte. Este error se aminora durante la fabricación cuando el termómetro se sella a su temperatura más baja, de modo que contenga la cantidad máxima de aire en el tubo.

- c) Cambios lentos del líquido: los líquidos orgánicos utilizados tienden a polimerizarse con el paso del tiempo y con la exposición a la luz, lo que hace que el volumen del líquido disminuya gradualmente. La presencia de impurezas puede acelerar este efecto; se ha demostrado, en particular, que la presencia de acetona en el alcohol etílico resulta muy perjudicial. Por consiguiente, habrá que extremar las precauciones al preparar el líquido para el termómetro. Este efecto podría acentuarse si se utilizan tintes para colorear el líquido, con el fin de que este sea más visible.

La reducción de los errores producidos por la rotura de la columna de líquido y los cuidados generales de los termómetros de alcohol se abordan al final del capítulo.

2.2.5 **Comparación y calibración**

2.2.5.1 **Calibración en laboratorio**

La calibración de termómetros en laboratorio debería ser realizada por laboratorios de calibración acreditados. Para los termómetros de líquido en cápsula de vidrio se debería utilizar un baño líquido, en el interior del cual tendría que ser posible mantener la temperatura en el valor deseado, dentro del intervalo requerido. La rapidez con que varíe la temperatura del líquido no debería rebasar los límites recomendados, y el aparato de calibración habría de disponer de algún medio para agitar el líquido. Los termómetros de referencia y los que sean objeto de calibración deberían estar suspendidos independientemente del recipiente, totalmente sumergidos y sin tocar los lados.

Debería llevarse a cabo un número suficiente de mediciones para asegurarse de que las correcciones que se aplicarán representan el funcionamiento del instrumento en condiciones normales, con errores causados por la interpolación en cualquier punto intermedio no mayores que los errores no sistemáticos (véase el capítulo 4 de la parte VI).

2.2.5.2 **Comprobaciones y calibración en condiciones reales**

Todos los termómetros de líquido en cápsula de vidrio experimentan cambios graduales del nivel cero. Por esta razón será conveniente comprobarlos a intervalos regulares, en términos generales una vez cada dos años. Deberían mantenerse en posición vertical, a temperatura ambiente, al menos durante 24 horas antes de comenzar el proceso de comprobación.

El punto de congelación puede comprobarse llenando casi completamente un vaso Dewar con hielo picado obtenido a partir de agua destilada y humedeciéndolo con más agua destilada. Tanto el espacio entre los trozos de hielo como el fondo del vaso deberían estar exentos de aire. El agua debería mantenerse a 2 cm por debajo de la superficie del hielo. Un termo ordinario bastará para sumergir totalmente la mayoría de los termómetros hasta que alcancen su punto de congelación. Los termómetros deberían insertarse de manera que la columna de mercurio o de alcohol sobresalga lo menos posible del hielo. Antes de leer la temperatura indicada se dejarían transcurrir al menos 15 minutos para que el termómetro alcance la temperatura del punto de fusión del hielo. Cada termómetro se debería mover hacia atrás y hacia adelante entre la mezcla, e inmediatamente se leerá hasta la décima parte del intervalo de la escala. A continuación, sería preciso tomar otras lecturas a intervalos de 5 minutos y calcular un valor medio.

Para cubrir otros puntos de la escala puede tomarse como referencia un termómetro patrón itinerante o un termómetro patrón de inspección. La comparación se debería efectuar sumergiendo el termómetro de referencia junto con el termómetro o termómetros que habrán de calibrarse en un recipiente hondo lleno de agua. Suele ser más conveniente operar en el interior, especialmente si brilla el sol, y los mejores resultados se obtendrán cuando el agua esté a la temperatura ambiente, o próxima a ella.

Cada termómetro se comparará con el termómetro de referencia; los que sean de un mismo tipo podrán compararse entre sí. Para cada comparación, se sujetarán los termómetros con los bulbos juntos, se moverán hacia adelante y hacia atrás en el agua durante aproximadamente 1 minuto,

y seguidamente se hará la lectura. Debe ser factible leer ambos termómetros sin variar la profundidad de inmersión; con esta condición, los bulbos deberían estar sumergidos en el agua a la mayor profundidad posible. La mayoría de los termómetros meteorológicos están calibrados para su inmersión total; siempre y cuando la diferencia entre las temperaturas del agua y del aire no exceda de 5 K, la corrección del tubo saliente debería ser insignificante. Con frecuencia ocurre que, encontrándose los bulbos a la misma profundidad, la altura de la columna de mercurio (o de otro líquido) del termómetro sometido a comprobación no estará muy próxima a la del termómetro de referencia. Por esta razón, habría que tener cuidado para evitar los errores de paralaje.

Sería preciso llevar a cabo estas comparaciones al menos tres veces para cada par de termómetros. Para cada conjunto de comparaciones, la media de las diferencias entre lecturas no debería exceder de las tolerancias especificadas en el cuadro de la sección 2.1.3.2.

Los termómetros de suelo pueden calibrarse mediante este método, pero habría que dejarlos en el agua durante al menos 30 minutos para que la cera en la que están introducidos los bulbos alcance la temperatura del agua. Dado que su constante de tiempo tiene un valor alto, es difícil comprobar bien los termómetros de suelo a menos que la temperatura del agua pueda mantenerse muy constante. Si la calibración se hace cuidadosamente en agua cuya temperatura no varíe más que 1 K en 30 minutos, la diferencia respecto de la lectura corregida del termómetro de referencia no debería exceder de 0,25 K.

2.2.6 Correcciones

Al ser entregados por primera vez, los termómetros (identificados por un número de serie) deberían ir acompañados de un certificado fechado que confirme que cumplen con la incertidumbre requerida, o de un certificado de calibración fechado en el que se indiquen las correcciones que se deberían aplicar a las lecturas para respetar los requerimientos de incertidumbre.

Por lo general, si el margen de error encontrado en determinados puntos del rango de un termómetro (por ejemplo, 0 °C, 10 °C y 20 °C) no excede en ningún caso de 0,05 K, no serán necesarias correcciones, y el instrumento podrá utilizarse directamente como un termómetro ordinario en garitas con ventilación natural, o como un termómetro de máxima, de mínima, de suelo o de mínima de la hierba. Si los errores de esos puntos fueran superiores a 0,05 K, debería facilitarse al observador, en el lugar de la lectura, una tabla de correcciones con instrucciones claras sobre la manera de aplicarlas.

Los termómetros para los que normalmente se deberían entregar certificados son:

- a) los que se utilizan en psicrómetros ventilados;
- b) los que utilizan los inspectores como patrones itinerantes;
- c) los que se utilizan como referencia de calibración en el laboratorio;
- d) los que se utilizan para fines especiales en los que esté justificada la aplicación de correcciones.

Si se van a utilizar en psicrómetros ventilados, convendría escoger termómetros idénticos.

2.2.7 Mantenimiento

2.2.7.1 Rotura de la columna de líquido

El fallo más habitual es la rotura de la columna del líquido, especialmente durante los desplazamientos. Los termómetros más propensos a este tipo de incidentes son los de alcohol

(de mínima). Otros problemas que plantean estos termómetros son la adherencia del alcohol al vidrio y la formación de gotas de alcohol por destilación en la parte de la perforación correspondiente al soporte.

Por lo general, una columna de líquido rota puede recomponerse sujetando el termómetro con el extremo del bulbo hacia abajo y golpeándolo suave y rápidamente con los dedos o con algún objeto elástico que no sea demasiado duro. El golpeteo debería continuar durante algún tiempo (5 minutos, si fuera necesario), pasado el cual el termómetro debería colgarse o colocarse de pie en un recipiente adecuado, con el bulbo hacia abajo, durante al menos 1 hora, a fin de que el alcohol que pudiera seguir adherido al vidrio escurra hacia la columna principal. Si este procedimiento no diera resultado, un método más drástico consistirá en refrigerar el bulbo en una mezcla congelante de agua y sal, manteniendo templada la parte superior del tubo; hecho esto, el líquido caerá lentamente por destilación a la columna principal. Otra posibilidad será mantener vertical el termómetro, con el bulbo en un recipiente de agua templada, al tiempo que se golpea o sacude el tubo, sacándolo del agua en cuanto la cima del alcohol alcance la cámara de seguridad situada en la parte superior del tubo. Este método debe emplearse con precaución, ya que el instrumento podría reventar si el alcohol invade la cámara de seguridad.

2.2.7.2 ***Ilegibilidad de la escala***

Otro de los problemas de los termómetros de líquido en cápsula de vidrio sin revestimiento es que, con el tiempo, la escala puede llegar a ser ilegible. Esto se subsanará en la estación frotando la escala con un lápiz oscuro o con un lápiz de grafito.

2.2.8 **Seguridad**

El mercurio, que es el líquido más habitualmente utilizado en los termómetros de líquido en cápsula de vidrio, es tóxico si se ingiere o si se inhala su vapor. Si un termómetro se rompiera y no se limpiaran las gotitas de mercurio, sería peligroso para la salud, especialmente en espacios cerrados (en el capítulo 3 de la parte I (sección 3.2) sobre barómetros de mercurio, se dan indicaciones sobre limpieza en caso de rotura). Además, podrían existir limitaciones para el transporte de termómetros de mercurio en aeronaves, o la obligación de adoptar medidas especiales de precaución para evitar el derrame del mercurio en caso de rotura. Convendría ser informado al respecto por la autoridad o compañía de transporte pertinente.

2.3 **TERMÓGRAFOS MECÁNICOS**

2.3.1 **Descripción general**

Los tipos de termógrafos mecánicos que aún se utilizan habitualmente están dotados de sensores bimetalicos o de tubo de Bourdon, ya que son relativamente económicos, fiables y portátiles. Sin embargo, no son fáciles de adaptar para registrar datos a distancia o electrónicamente. Estos termógrafos incorporan un mecanismo de gráfica rotatoria común a la familia de instrumentos de registro clásicos. En términos generales, los termógrafos deberían poder funcionar en un rango de temperaturas de unos 60 K, o incluso 80 K si se van a utilizar en climas continentales. Los valores de la escala estarán espaciados de modo que sea posible leer sin dificultad la temperatura a intervalos de 0,2 K, en una banda registradora de tamaño razonable. Para ello, debería disponerse lo necesario para modificar la puesta a cero del instrumento en concordancia con la estación del año. El error máximo de un termógrafo no debería exceder de 1 K.

2.3.1.1 ***Termógrafo bimetalico***

En los termógrafos bimetalicos, el movimiento de la plumilla registradora está controlado por el cambio de curvatura de una cinta o hélice bimetalica, un extremo de la cual está rígidamente unido a un brazo fijado al armazón. Debería ser posible realizar un ajuste fino de dicho brazo,

a fin de poder modificar el cero del instrumento cuando fuera necesario. Además, el instrumento debería permitir alterar los valores de la escala ajustando la longitud de la palanca que transfiere el movimiento de la lámina bimetálica a la plumilla; idealmente, sería conveniente dejar este ajuste en manos de personal autorizado. El elemento bimetálico debería estar adecuadamente protegido contra la corrosión; para ello, lo mejor sería contar con una laminación fuerte de cobre, níquel o cromo, aunque una capa de laca puede resultar adecuada en algunos climas. A una velocidad del aire de 5 m s^{-1} , la constante de tiempo habitual es de unos 25 segundos.

2.3.1.2 **Termógrafo de tubo de Bourdon**

En este caso, la disposición general es similar a la del tipo bimetálico, pero el elemento sensible a la temperatura tiene forma de tubo metálico curvo, de sección plana y elíptica, y está relleno de alcohol. El tubo de Bourdon es menos sensible que el elemento bimetálico y, por lo general, es necesario un mecanismo multiplicador del nivel que dé una escala con valor suficiente. A una velocidad del aire de 5 m s^{-1} la constante de tiempo habitual es de unos 6 segundos.

2.3.2 **Procedimientos de medición**

Con objeto de mejorar la resolución de la lectura, los termógrafos se ajustarán con frecuencia, en diferentes estaciones del año, de acuerdo con el rango de temperaturas considerado en cada caso en los dos tipos de banda existentes. La fecha exacta del cambio de un conjunto de bandas a otro variará según el lugar, pero una vez que se efectúe habrá que ajustar el instrumento. Esta operación se debería llevar a cabo o bien en la garita, en un día nuboso y ventoso, a una hora en que la temperatura fuera prácticamente constante, o bien en un recinto donde la temperatura fuera constante. El ajuste se realizará aflojando el tornillo que sujeta el brazo de la plumilla a su vástago, desplazando seguidamente el brazo hasta la posición correcta, y apretando de nuevo los tornillos. A continuación, el instrumento debería permanecer tal como ha quedado, hasta que se efectuara una nueva comprobación y se introdujeran los ajustes necesarios.

2.3.3 **Exposición y emplazamiento**

Estos instrumentos se deberían exponer en una garita meteorológica de gran tamaño.

2.3.4 **Fuentes de error**

En el propio mecanismo del termógrafo, la fricción es una de las principales causas de error. Ello puede deberse a un mal alineamiento de la hélice con respecto al vástago. A menos que se coloque en su sitio exacto, la hélice actuará como un potente resorte y, si tiene un anclaje rígido, empujará el vástago principal contra uno de los laterales de la articulación. En los instrumentos modernos esto no debería suponer un problema importante ya que la fricción entre la plumilla y la banda puede reducirse al mínimo ajustando adecuadamente la suspensión de la compuerta.

2.3.5 **Comparación y calibración**

2.3.5.1 **Calibración en laboratorio**

Existen fundamentalmente dos métodos para la calibración en laboratorio de los termógrafos bimetálicos. Uno de ellos se basa en la fijación del instrumento en una determinada posición, con el elemento bimetálico sumergido en un baño de agua. El otro consiste en instalar el termógrafo en una cámara de calibración adquirida en el mercado, equipada con un mecanismo de control de la temperatura del aire, un ventilador y un termómetro de referencia.

Las comparaciones deberían efectuarse a dos temperaturas distintas, a partir de las cuales se podrán determinar los cambios que fueran necesarios respecto del cero y del mecanismo de ampliación. Los ajustes de la escala deberían ser efectuados por personal autorizado, y solo después de consultar el correspondiente manual del fabricante del instrumento.

2.3.5.2 **Comparación en condiciones reales**

Dado que la constante de tiempo del instrumento puede llegar a ser la mitad de la del termómetro de mercurio ordinario, las comparaciones de rutina de las lecturas del bulbo seco y del termógrafo a horas predeterminadas no coincidirán exactamente, por lo general, aunque el instrumento funcione perfectamente. Un procedimiento mejor consiste en comprobar la lectura del instrumento en un día adecuado y a una hora en que la temperatura sea casi constante (normalmente, en un día nublado y ventoso), o bien en comparar las lecturas mínimas de la gráfica del termógrafo con la lectura del termómetro de mínima colocado en la misma garita. Seguidamente, pueden efectuarse los ajustes necesarios mediante el tornillo de regulación.

2.3.6 **Correcciones**

Por lo general, los termógrafos no se entregan con certificados con correcciones. Si las comprobaciones efectuadas en la estación indican que el instrumento tiene demasiados errores, y no es posible corregirlos *in situ*, debería enviarse el instrumento a un laboratorio de calibración apropiado para su reparación y recalibrado.

2.3.7 **Mantenimiento**

El mantenimiento de rutina consistirá en inspeccionar el estado general externo, el juego de las articulaciones, la inclinación del brazo registrador, el ajuste de la plumilla, el ángulo entre el brazo amplificador y el brazo registrador, y la programación del reloj del mecanismo de gráficas. Estos exámenes deberían realizarse de conformidad con las recomendaciones del fabricante. En general, habría que manipular con cuidado la hélice para evitar que sufra daños mecánicos y a fin de que se mantenga limpia. Las articulaciones del vástago también deberían mantenerse limpias y lubricarse periódicamente con una pequeña cantidad de lubricante de relojes. La mecánica del instrumento es muy simple y, si se adoptan las precauciones adecuadas para que la fricción sea mínima y para evitar la corrosión, debería prestar un buen servicio.

2.4 **TERMÓMETROS ELÉCTRICOS**

2.4.1 **Descripción general**

Los instrumentos eléctricos se utilizan mucho actualmente en meteorología para medir las temperaturas. Su virtud principal estriba en su capacidad de proporcionar una señal de salida adecuada para indicar, registrar, almacenar o transmitir a distancia datos de temperatura. Los sensores más frecuentemente utilizados son las resistencias eléctricas, los termómetros de semiconductor (termistores) y los termopares.

2.4.1.1 **Termómetros de resistencia eléctrica**

Una de las maneras de representar la temperatura consiste en medir la resistencia eléctrica de un material cuando esta varía de forma conocida con la temperatura de dicho material.

Para pequeñas variaciones de la temperatura el aumento de la resistencia de los metales puros es proporcional al cambio de la temperatura, según expresa la ecuación 2.2:

$$R_T = R_0 [1 + \alpha (T - T_0)] \quad (2.2)$$

donde $(T - T_0)$ es pequeño; R_T es la resistencia de una determinada cantidad del metal a la temperatura T ; R_0 es su resistencia a la temperatura de referencia T_0 , y α es el coeficiente de temperatura de la resistencia en las proximidades de T_0 .

Tomando $0\text{ }^\circ\text{C}$ como temperatura de referencia, la ecuación 2.2 se convierte en:

$$R_T = R_0(1 + \alpha \cdot t) \quad (2.3)$$

Para cambios de temperatura mayores y para ciertas aleaciones metálicas, la ecuación 2.4 expresa esta relación con mayor exactitud:

$$R_T = R_0 \left[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 \right] \quad (2.4)$$

Tomando $0\text{ }^\circ\text{C}$ como temperatura de referencia, la ecuación 2.4 vendrá expresada como:

$$R_T = R_0(1 + \alpha \cdot t + \beta \cdot t^2) \quad (2.5)$$

Estas ecuaciones expresan la variación proporcional de la resistencia de un termómetro real, de tal modo que los valores de los coeficientes α y β puedan obtenerse por calibración del termómetro de que se trate. A partir de esos resultados puede obtenerse la función inversa, t , en función de R . Dicha función puede expresarse en forma de serie de potencias de $(R_0 - R_T)$, es decir, $t = t(R_0 - R_T) = c_1(R_0 - R_T) + c_2(R_0 - R_T)^2 + \dots$

Un buen termómetro de resistencia metálica satisfará los requisitos siguientes:

- Sus propiedades físicas y químicas permanecerán invariables en todo el rango de medición de temperatura.
- Su resistencia aumentará uniformemente a medida que aumente la temperatura, sin interrupción a lo largo del rango de medición.
- Influencias externas tales como la humedad, la corrosión o las deformaciones físicas no alterarán su resistencia de manera apreciable.
- Sus características se mantendrán inalteradas durante al menos dos años.
- Su resistencia y coeficiente térmico deberían ser lo suficientemente elevados como para ser utilizados en un circuito de medición.

El platino puro es el material que mejor satisface estos requisitos. Por ello, se utiliza en los termómetros patrón primarios necesarios para transferir la EIT-90 entre las distintas localizaciones de los instrumentos. Los termómetros de platino también se usan como patrones secundarios y para los sensores operativos.

En la práctica, los termómetros se someten a envejecimiento artificial antes de su utilización, y los destinados a fines meteorológicos suelen estar fabricados de aleaciones de platino, níquel o cobre y, ocasionalmente, tungsteno. Lo normal es que estén herméticamente sellados con una cubierta de cerámica. Su constante de tiempo es menor que la de los termómetros de líquido en cápsula de vidrio.

2.4.1.2 **Termómetros de semiconductor**

Otro tipo de elemento de resistencia habitualmente utilizado es el termistor. Se trata de un semiconductor con un coeficiente térmico de resistencia relativamente elevado, que puede ser positivo o negativo, según el material. Las mezclas de óxidos metálicos sinterizados son adecuadas para fabricar termistores, por lo general en forma de pequeños discos, varillas o esferas, y a menudo recubiertos de vidrio. El valor de la temperatura en función de la resistencia, R , del termistor viene expresado por la ecuación 2.6:

$$R = a \exp(b/T) \quad (2.6)$$

donde a y b son constantes, y T es la temperatura del termistor expresada en kélvines.

Desde un punto de vista termométrico, los termistores presentan las ventajas siguientes:

- a) Su elevado coeficiente térmico de resistencia permite reducir el voltaje aplicado a través de un puente de resistencia y obtener a la vez la misma sensibilidad, reduciendo de ese modo, o incluso eliminando, la necesidad de tener en cuenta la resistencia de los conductores y sus variaciones.
- b) Sus elementos pueden fabricarse de muy pequeño tamaño, de modo que su baja capacidad térmica implique una constante de tiempo pequeña; sin embargo, los termistores muy pequeños, cuya capacidad térmica es baja, presentan la desventaja de que, para un valor de disipación dado, el efecto de autocalentamiento es mayor que para los termómetros grandes y, por ello, habrá que cuidar de que la disipación de energía sea baja.

La resistencia de un termistor típico varía en un factor de 100 o 200 en el intervalo de temperaturas de -40 °C a 40 °C.

2.4.1.3 Termopares

En 1821 Seebeck descubrió que en el punto de contacto entre dos metales diferentes se generaba una pequeña fuerza electromotriz. Si se construye un circuito simple con dos metales y con el punto de reunión entre estos a una misma temperatura, la fuerza electromotriz resultante será nula, ya que las dos fuerzas electromotrices generadas, una en cada unión, serán exactamente opuestas y se anularán entre sí. Si se altera la temperatura de una de las uniones, las dos fuerzas ya no se cancelarán, y se obtendrá una fuerza electromotriz neta en el circuito; es decir, pasará corriente. Cuando haya varias uniones, la fuerza electromotriz resultante será la suma algebraica de las distintas fuerzas electromotrices. La magnitud y el signo de la fuerza electromotriz de contacto que se establece en una de las uniones, sea cual sea, dependerá de los tipos de metales unidos y de la temperatura del punto de unión, y podrá representarse empíricamente para dos metales cualesquiera, mediante la expresión:

$$(E_T - E_S) = \alpha(T - T_S) + \beta(T - T_S)^2 \quad (2.7)$$

donde E_T es la fuerza electromotriz de contacto a una temperatura T , y E_S es la fuerza electromotriz a una temperatura de referencia T_S , siendo α y β constantes. Si hubiera dos uniones a temperaturas T_1 y T_2 , la fuerza electromotriz neta E_n (la fuerza electromotriz térmica) vendrá expresada por $(E_1 - E_2)$, donde E_1 es la fuerza electromotriz a la temperatura T_1 y E_2 es la fuerza electromotriz de contacto a la temperatura T_2 . El valor E_n puede representarse también mediante una fórmula cuadrática del tipo indicado para $(E_T - E_S)$ con una buena aproximación:

$$E_n = E_1 - E_2 \quad (2.8)$$

$$E_n = a(T_1 - T_2) + b(T_1 - T_2)^2 \quad (2.9)$$

donde a y b son constantes para los dos metales en cuestión. Para la mayoría de los fines meteorológicos, generalmente se puede prescindir del valor de b , ya que es siempre pequeño en comparación con a .

Los termopares se construyen soldando entre sí hilos de los distintos metales que se utilicen. Estas uniones pueden llegar a ser muy pequeñas, y tener una capacidad calorífica despreciable.

Para medir temperaturas se medirá la fuerza electromotriz generada cuando una de las uniones se mantiene a una temperatura de referencia conocida, dejando que la otra alcance la temperatura requerida. Mediante una calibración previa del sistema, puede establecerse una relación directa entre esta fuerza electromotriz y la diferencia de temperatura entre las dos uniones, con lo cual la temperatura desconocida se calcula sumando algebraicamente esa diferencia a la temperatura de referencia conocida.

En meteorología, los termopares se utilizan mayormente cuando se necesita un termómetro con una constante de tiempo muy pequeña, del orden de 1 o 2 segundos, que permita leer y

registrar los valores a distancia, por lo general para tareas de investigación especiales. Cuando se desea conocer la temperatura absoluta, uno de los inconvenientes es que se necesita un recinto a temperatura constante tanto para la unión en frío como para los aparatos auxiliares destinados a medir la fuerza electromotriz generada; los termopares son especialmente útiles para medir diferencias de temperatura, ya que este tipo de situaciones no plantean este inconveniente. Con un aparato suficientemente sensible podrá lograrse una exactitud muy alta, pero será necesario efectuar calibraciones frecuentes. Las combinaciones cobre/constantán o hierro/constantán son adecuadas para las tareas meteorológicas, dado que la fuerza electromotriz que producen por grado Celsius es mayor que la que pueden generar los metales más raros y costosos que se utilizan, por lo general, para altas temperaturas.

2.4.2 Procedimientos de medición

2.4.2.1 Termómetros de resistencia eléctrica

Los termómetros de resistencia eléctrica pueden conectarse a muy distintos tipos de circuitos de medición eléctricos, muchos de los cuales son variaciones de circuitos de puente de resistencia, equilibrados o no. Para efectuar la medición en un puente equilibrado, se ajusta un potenciómetro de precisión hasta que deje de pasar corriente por un indicador; la posición del brazo del potenciómetro estará relacionada con la temperatura. En un puente no equilibrado, puede medirse la corriente de desequilibrio mediante un galvanómetro; esta, sin embargo, no es simplemente una función de la temperatura, sino que depende en parte de otros efectos. Una alternativa que evita esta situación consiste en utilizar una fuente de corriente constante para alimentar el puente y para medir el voltaje de desequilibrio, a fin de obtener la lectura de la temperatura.

En el caso de la medición a distancia, habría que tener en cuenta que el hilo que conecta el termómetro de resistencia con el puente tiene también una resistencia que varía en función de la temperatura. Para evitar estos errores pueden adoptarse las precauciones adecuadas.

Los voltímetros digitales pueden utilizarse junto con una fuente de corriente constante para medir la caída de tensión por efecto de la temperatura a lo largo del elemento que constituye el termómetro; la señal de salida puede aparecer directamente expresada en unidades de temperatura. Asimismo, la señal de salida digital puede almacenarse o transmitirse sin pérdida de exactitud, a fin de ser utilizada más adelante. Si se desea, la señal de salida de los voltímetros digitales puede convertirse de nuevo en un voltaje analógico, por ejemplo, para alimentar un dispositivo registrador.

2.4.2.2 Termopares

Existen dos métodos principales para medir la fuerza electromotriz producida por los termopares:

- a) medir la corriente producida en el circuito con un galvanómetro sensible; y
- b) equilibrar la fuerza electromotriz termoeléctrica con una fuerza electromotriz conocida de manera que, de hecho, no fluya ninguna corriente por los termopares.

El método a) consiste en conectar directamente el galvanómetro en serie con las dos uniones. El método b) se utilizará, por lo general, cuando se requiera una incertidumbre de medición inferior al 0,5%. Este procedimiento no dependerá de la magnitud, ni de los cambios de la resistencia de la línea, ya que en el estado equilibrado no fluye corriente alguna.

2.4.3 **Exposición y emplazamiento**

Las condiciones requeridas para la exposición y el emplazamiento de los termómetros eléctricos serán, por lo general, las mismas que para los termómetros de líquido encapsulado en vidrio (véase la sección 2.2.3). Algunas excepciones son:

- a) La medición de valores extremos: si el termómetro eléctrico está conectado con un sistema de registro de datos en funcionamiento constante, puede no ser necesario utilizar termómetros de máxima y de mínima por separado.
- b) La medición de temperaturas de superficie: las propiedades radiativas de los termómetros eléctricos serán diferentes de las de los termómetros de líquido en cápsula de vidrio. Por consiguiente, los termómetros eléctricos expuestos como termómetros de mínima de la hierba (u otros tipos de superficie) registrarán valores diferentes de los termómetros convencionales expuestos en condiciones análogas. Estas diferencias podrán minimizarse instalando el termómetro eléctrico dentro de una cubierta de vidrio.
- c) La medición de temperaturas del suelo: para medir la variación diurna de la temperatura del suelo resulta bastante inadecuado utilizar termómetros de mercurio en cápsula de vidrio introducidos en tubos de acero en posición vertical, debido a la conducción de calor desde la superficie. Pueden obtenerse lecturas mucho más representativas colocando termómetros eléctricos en clavijas de latón, insertadas a la profundidad adecuada en una cara vertical de una excavación realizada en el suelo, exenta de perturbaciones. Las conexiones eléctricas se sacan al exterior de la excavación, a través de tubos de plástico, rellenándose a continuación aquella de modo que se restablezcan, en la medida de lo posible, la estratificación y las características de drenaje originales del suelo.

2.4.4 **Fuentes de error**

2.4.4.1 **Termómetros de resistencia eléctrica**

Las principales causas de error en una medición de temperatura realizada mediante termómetros de resistencia eléctrica son:

- a) autocalentamiento del termómetro;
- b) inadecuada compensación de la resistencia del cable conductor;
- c) inadecuada compensación de las relaciones no lineales en el sensor o en el instrumento procesador;
- d) cambios bruscos de la resistencia de contacto de los conmutadores.

Se produce autocalentamiento porque el paso de corriente por la resistencia genera calor, haciendo que la temperatura del termómetro se eleve por encima de la del medio circundante.

La resistencia de los conductores de conexión introducirá un error en la lectura de la temperatura, que será tanto mayor cuanto más largos sean los conductores, por ejemplo, cuando el termómetro de resistencia esté situado a cierta distancia del instrumento de medición; los errores de lectura variarán también con los cambios de temperatura de los cables. Estos errores pueden compensarse utilizando conductores adicionales, resistores estabilizadores, o una red de puentes apropiada. Con objeto de reducir errores, es muy recomendable utilizar termómetros de resistencia de platino de cuatro hilos.

Ni el termómetro de resistencia eléctrica ni el termistor son lineales a lo largo de un rango de temperaturas amplio, pero pueden arrojar un resultado aproximadamente lineal si el rango es limitado. Así pues, habrá que compensar esa falta de linealidades. Esto es aplicable sobre todo a los termistores, a fin de obtener un rango de valores de medición utilizable en meteorología.

Con el envejecimiento, la resistencia de contacto de los conmutadores puede experimentar cambios repentinos. Estos cambios pueden ser variables y pasar inadvertidos, a menos que se realicen regularmente calibraciones del sistema (véase la sección 2.4.5).

2.4.4.2 **Termopares**

Las causas principales de error cuando se mide la temperatura mediante un termopar son:

- a) Cambios en las resistencias de los conectores provocados por la temperatura. Este efecto puede reducirse al mínimo si los conductores son lo más cortos y compactos posible, y si se mantienen bien aislados.
- b) Conducción desde la unión a lo largo del conductor cuando existe un gradiente térmico en las proximidades del punto de medición de temperatura.
- c) Fuerzas electromotrices secundarias erráticas de origen térmico, producidas por la utilización de metales diferentes de los del termopar en el circuito de conexión. Por consiguiente, las diferencias de temperatura en el resto del circuito deben ser lo más pequeñas posible; esto último es especialmente importante cuando las fuerzas electromotrices que se han de medir son pequeñas (para lo cual, será necesario realizar recalibraciones periódicas).
- d) Corrientes de fugas que pueden producirse desde circuitos de potencia cercanos. Este efecto puede minimizarse mediante un apantallamiento adecuado de los conductores.
- e) Corrientes galvánicas que pueden producirse si se humedecen los conductores o las uniones.
- f) Cambios de temperatura del galvanómetro que alteran sus características (fundamentalmente, modificando su resistencia). Este cambio no afectará en absoluto las lecturas efectuadas mediante potenciómetro, aunque sí afectará los instrumentos de lectura directa. Este efecto puede reducirse al mínimo manteniendo la temperatura del galvanómetro lo más cercana posible a la temperatura a la que fue calibrado el circuito.
- g) En la medición realizada mediante potenciómetro, cambios en la fuerza electromotriz de la pila patrón con respecto a la cual se ajusta la corriente del potenciómetro, y cambios en la corriente del potenciómetro entre ajustes, que producirán los consiguientes errores en las mediciones de la fuerza electromotriz. Por lo general, estos errores serán pequeños siempre que se trate correctamente la pila patrón y se introduzcan ajustes en la corriente del potenciómetro inmediatamente antes de efectuar una medición de temperatura.

Los errores de tipo a) y f) ponen de relieve la mayor fiabilidad del método potenciométrico cuando se requiere un alto grado de exactitud.

2.4.5 **Comparación y calibración**

2.4.5.1 **Termómetros de resistencia eléctrica**

Las técnicas y procedimientos básicos para la calibración en laboratorio y para la comprobación en condiciones reales de los termómetros eléctricos serán las mismas que las usadas en los termómetros de líquido en cápsula de vidrio (véase la sección 2.2.5). En general, sin embargo, no será posible trasladar hasta un recinto interior los termómetros de resistencia, ya que los conductores eléctricos normales del termómetro deberían someterse también a comprobación. Así pues, las comprobaciones tendrán que efectuarse con los termómetros en el interior de la garita. Será difícil llevar a cabo mediciones comparativas precisas de las temperaturas indicadas por el termómetro eléctrico respecto de un termómetro de referencia de mercurio en cápsula de vidrio, o de un termómetro de resistencia que indique la temperatura local, a menos que haya dos observadores. Dado que el instrumento de medición es parte integrante del termómetro

eléctrico, su calibración puede comprobarse sustituyendo el termómetro de resistencia por una caja de décadas resistivas de precisión, y aplicando el equivalente en resistencia a unos incrementos de temperatura fijos de 5 K en el rango de temperaturas operativo. En cualquier punto, el error no debería exceder de 0,1 K. Normalmente, esta operación deberá ser realizada por un técnico.

2.4.5.2 **Termopares**

Para la calibración y comprobación de los termopares es preciso mantener las uniones en caliente y en frío a temperaturas conocidas con exactitud. Las técnicas e instrumentos necesarios para realizar este trabajo suelen ser muy especializados, y no se describirán en el presente texto.

2.4.6 **Correcciones**

Cuando se entregan por primera vez, los termómetros eléctricos (que tienen un número de serie) deberían ir acompañados de:

- a) un certificado fechado que confirme el cumplimiento de la norma apropiada; o bien
- b) un certificado de calibración fechado que indique la resistencia real en determinados puntos fijos del rango de temperaturas; estas resistencias deberían utilizarse cuando se comprobase la incertidumbre de medición del instrumento o de la interfaz del sistema antes y durante el funcionamiento; en términos generales, la diferencia entre el valor efectivo de la resistencia y el valor nominal no debería ser superior al equivalente de un error de temperatura de 0,1 o 0,2 K.

2.4.7 **Mantenimiento**

En las comprobaciones regulares sobre el terreno se deberían detectar cualesquiera cambios que se hubieran producido en la calibración del sistema. Estos podrían ser causados por una alteración de las características eléctricas del termómetro durante largos períodos, por el deterioro de los cables eléctricos o de sus conexiones, por una variación de la resistencia de contacto de los conmutadores, o por cambios en las características eléctricas del equipo de medición. Para determinar el origen exacto y la manera de corregir esos errores se necesitará el equipo adecuado y una formación especializada, y la tarea debería encomendarse únicamente a un técnico de mantenimiento.

2.5 **PROTECCIÓN CONTRA LAS RADIACIONES**

Las protecciones o garitas contra las radiaciones deberían estar diseñadas de modo que proporcionaran un recinto con una temperatura interna uniforme e igual a la del aire circundante. Deberían rodear completamente el termómetro y protegerlo del calor radiante, de la precipitación y de otros fenómenos que podrían influir en la medición.

Las garitas con ventilación forzada, en donde un ventilador dirige el aire hacia el termómetro, podrán ayudar a evitar errores cuando el microclima dentro de la garita difiera del de la masa de aire circundante. Este tipo de desviación únicamente ocurre cuando la velocidad natural del viento es muy baja ($< 1 \text{ m s}^{-1}$). Cuando se utilice este tipo de ventilación artificial, habría que evitar cuidadosamente que se depositaran aerosoles y gotas de lluvia sobre el sensor, lo cual rebajaría su temperatura hacia la temperatura del termómetro húmedo. Se alienta a los fabricantes de protecciones contra las radiaciones ventiladas artificialmente a que proporcionen indicaciones claras (como una luz de diodo electrolumínico (LED)) sobre el estado del ventilador directamente en la garita o en la unidad de control o registrador de datos, a fin de que el personal de mantenimiento pueda comprobar por inspección visual si un ventilador está

funcionando debidamente. Además, a efectos de un control automático, en la salida de datos debería proporcionarse información sobre el estado del ventilador y preferiblemente sobre su velocidad.

Para este tipo de protección, el material más adecuado podría ser el metal altamente pulimentado e inoxidable, a causa de su alta reflectividad y baja absorción de calor. No obstante, sería preferible un material aislante térmico de plástico en razón de la sencillez de su mantenimiento. Si el sistema emplea ventilación natural deberá utilizarse un material aislante térmico.

El funcionamiento de las garitas (pautas de respuesta y efectos del microclima que ocasionan errores inoportunos) depende, en gran medida, de su diseño por lo que, al diseñarlas, conviene tomar precauciones y asegurarse de que constituyen una protección contra las radiaciones y de que cuentan con una ventilación suficiente. Desde que se iniciaron las mediciones de temperatura con fines meteorológicos, se han concebido muy diversos tipos de garitas. Tras la introducción de mediciones de temperatura efectuadas en estaciones meteorológicas automáticas, se ha incrementado considerablemente la variedad de estos diseños (véase OMM, 1998a). Habida cuenta de los tipos diversos de aplicaciones concretas y del grado de automatización, así como de la climatología, es difícil recomendar un diseño en particular que pueda adaptarse a todas las mediciones efectuadas en cualquier lugar del mundo. Sin embargo, se han llevado a cabo muchos estudios e intercomparaciones sobre diferentes diseños y su correspondiente funcionamiento. En OMM (1972) se expone con claridad información general sobre diseños de garitas. En Andersson y Mattison (1991), Sparks (2001), OMM (1998b, 1998c, 1998d, 2000a, 2000b, 2002b, 2002c, 2002d y 2011) y Zanghi (1987) se facilitan los resultados de las intercomparaciones de garitas de termómetros.

Una norma internacional, la ISO/DIS 17714, define los tipos de protección más importantes y describe los métodos para determinar o comparar el funcionamiento de las garitas (ISO, 2007).

2.5.1 **Garitas de persiana**

Los distintos tipos de garitas de persiana se basan, en su mayoría, en la ventilación natural. Las paredes de la garita deberían ser, preferiblemente, de doble persiana; y la base, de listones entrelazados, aunque hay otros tipos de construcción que cumplen los requisitos mencionados. El techo debería ser de dos capas, dispuestas de tal modo que el espacio entre ellas pueda ventilarse. En climas fríos, y habida cuenta de la elevada reflectividad de la nieve (hasta un 88%), la garita debería estar provista también de un doble suelo. Sin embargo, sería preciso que, al mismo tiempo, el suelo fuera fácilmente abatible o basculante, a fin de poder evacuar la nieve que pudiera entrar en caso de temporal.

El tamaño y la construcción de la garita deberían poder mantener la capacidad calorífica lo más baja posible y dejar suficiente espacio entre los instrumentos y las paredes. Esta condición excluye toda posibilidad de contacto directo entre los elementos sensores y las paredes, y es particularmente importante en los trópicos, donde la insolación puede llegar a calentar las caras laterales hasta el punto de crear gradientes de temperatura apreciables en la garita. Debería evitarse también el contacto directo entre los elementos sensores y el soporte del termómetro. La garita debería estar pintada por dentro y por fuera con pintura blanca no higroscópica.

Cuando hay dos paredes, la capa de aire entre ellas sirve para reducir la cantidad de calor que, de otro modo, pasaría de la cara externa al recinto interior, especialmente si la insolación es intensa. Cuando la intensidad del viento es considerable, se renueva continuamente el aire que hay entre las paredes, disminuyendo con ello aún más la transmisión de calor desde las paredes externas hacia el interior.

La libre circulación de aire a través de la garita coadyuva a que la temperatura de la pared interior se adapte a los cambios del aire del ambiente. De este modo, la pared interior ejercerá una menor influencia sobre la temperatura del termómetro. Además, la libre circulación de aire en el interior de la garita permite al termómetro adaptarse a los cambios del aire circundante con mayor rapidez que si solo hubiera intercambios radiativos. Sin embargo, el aire que circula a través de la

garita permanece un tiempo limitado en contacto con las paredes exteriores, lo cual puede llegar a alterar su temperatura. Este efecto resulta apreciable cuando el viento es suave y la temperatura de la pared exterior es muy diferente de la temperatura del aire. Así cabe esperar que la temperatura del aire en una garita sea mayor que la temperatura verdadera del aire en días de sol intenso y aire calmado, ligeramente menor en noches despejadas y calmadas, con un posible error de hasta 2,5 K y -0,5 K, respectivamente, en casos extremos. Pueden producirse errores adicionales por efecto del enfriamiento causado por la evaporación en una garita húmeda después de la lluvia. Todos estos errores influyen también directamente en las lecturas de otros instrumentos situados dentro de la garita, por ejemplo, higrómetros, evaporímetros, etc.

Los errores debidos a variaciones de la ventilación natural pueden reducirse dotando la garita de un sistema de ventilación forzada, adecuadamente diseñado, que mantenga un caudal de ventilación constante y conocido, al menos a velocidades del viento bajas. Al diseñar estos sistemas, convendría tener cuidado de que el calor del ventilador o de otros motores eléctricos no afecte a la temperatura de la garita.

Por lo general, se necesita solo una puerta, y la garita estará situada de modo que el sol no dé sobre los termómetros cuando la puerta esté abierta en el momento de la observación. En los trópicos, será necesario utilizar dos puertas para períodos del año diferentes. Análogamente, en las regiones polares (en donde los rayos solares están muy inclinados) habría que adoptar precauciones para proteger el interior de la garita de los rayos directos del sol, o bien situándola en la sombra, o bien instalando la garita sobre un soporte de forma que aquella pueda ser girada hasta un ángulo apropiado mientras la puerta esté abierta para efectuar las lecturas.

Aunque todavía la mayoría de las garitas están fabricadas de madera, algunos diseños recientes que utilizan materiales plásticos ofrecen una mayor protección frente a los efectos de la radiación, ya que mejoran el diseño de la persiana y facilitan la circulación del aire. En cualquier caso, la garita y el soporte deberían fabricarse con materiales robustos e instalarse firmemente a fin de que los errores por efecto de la vibración del viento sean mínimos en las lecturas de máxima y mínima de los termómetros. En algunas zonas donde la vibración del viento no puede amortiguarse completamente, se recomienda instalar un soporte de fijación elástico. La cubierta del suelo bajo la garita debería ser de hierba o, en los lugares en que esta no crezca, la superficie natural del lugar.

La garita debería mantenerse limpia y pintarse con regularidad; en muchos lugares, suele ser suficiente con volver a pintarla una vez cada dos años, pero en áreas con contaminación atmosférica podría ser necesario hacerlo al menos una vez al año.

2.5.2 **Otras protecciones ventiladas artificialmente**

La principal alternativa a la exposición en una garita de persiana, ya sea con ventilación natural o artificial, consiste en proteger el bulbo de la radiación directa colocándolo en el eje de dos protecciones cilíndricas concéntricas y produciendo una corriente de aire (de una velocidad de entre 2,5 y 10 m s⁻¹) entre ellas, alejada del bulbo del termómetro. Este tipo de exposición es normal en los psicrómetros de aspiración (véase el capítulo 4 de la parte I). En principio, las protecciones deberían ser de un material aislante térmico, aunque en los psicrómetros de Assmann son de un metal muy pulimentado con objeto de reducir la absorción de la radiación solar. La protección interior se mantiene en contacto con una corriente de aire sobre ambas caras, de modo que su temperatura, y por consiguiente la del termómetro, pueda asemejarse mucho a la del aire. Las protecciones de este tipo suelen descansar sobre su soporte con el eje en posición vertical. La cantidad de radiación directa que penetra desde el suelo a través de la base es pequeña y puede reducirse ampliando considerablemente la base de las protecciones bajo el bulbo del termómetro. Cuando exista ventilación artificial producida por un ventilador eléctrico, habría que tener cuidado de evitar que el calor del motor y del ventilador llegue a los termómetros.

En el diseño del psicrómetro de referencia de la OMM se tienen adecuadamente en cuenta los efectos de la radiación y el uso de ventilación artificial y de protecciones, a fin de que el termómetro esté en equilibrio a la temperatura verdadera del aire (véase el capítulo 4 de la parte I).

ANEXO. DETERMINACIÓN DE LOS PUNTOS FIJOS DE LA ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURA DE 1990

Los puntos fijos de la Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90) que revisten interés para las mediciones meteorológicas aparecen indicados en el cuadro 2.A.1, mientras que los puntos de referencia secundarios figuran en el cuadro 2.A.2.

El método normalizado de interpolar valores entre los puntos fijos consiste en aplicar fórmulas que establecen la relación entre las indicaciones de los instrumentos patrón y los valores de la EIT-90 (BIPM, 1990). El instrumento patrón utilizado entre $-259,34\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $961,78\text{ }^{\circ}\text{C}$ es un termómetro de resistencia de platino.

Otro método práctico de aproximación a la EIT-90 para la calibración de termómetros de resistencia de platino (determinación de R_0 , A , B y C , véase la ecuación más adelante) consiste en obtener datos térmicos de resistencia estableciendo una comparación con un termómetro patrón de resistencia de platino calibrado en varias temperaturas en el rango de interés, y luego introducir un polinomio en los datos mediante un método de mínimos cuadrados.

La relación que existe entre la resistencia de termómetros de resistencia de platino objeto de calibración y la temperatura medida con un termómetro de referencia se describe con una ecuación de interpolación. La ecuación Callendar-Van Dusen es la que comúnmente se acepta como la ecuación de interpolación de termómetros de resistencia de platino industriales (definida en la norma IEC 60751, véase Comisión Electrotécnica Internacional, 2008), en lugar de termómetros patrón de resistencia de platino:

$$R_t = R_0 \left(1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100) \cdot t^3 \right)$$

donde R_t es la resistencia de un hilo de platino a la temperatura t , R_0 es su resistencia a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (punto de hielo), y A , B y C ($C = 0$ para $t > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) son constantes cuyo valor se obtiene mediante el método de mínimos cuadrados en los datos obtenidos durante la calibración.

Cuadro 2.A.1. Determinación de los puntos fijos en la EIT-90

Estado de equilibrio	Valor asignado en la EIT	
	K	$^{\circ}\text{C}$
Equilibrio entre las fases sólida, líquida y de vapor del argón (punto triple del argón)	83,805 8	-189,344 2
Equilibrio entre las fases sólida, líquida y de vapor del mercurio (punto triple del mercurio)	234,315 6	-38,834 4
Equilibrio entre las fases sólida, líquida y de vapor del agua (punto triple del agua)	273,160 0	0,01
Equilibrio entre las fases sólida y líquida del galio (punto de fusión del galio)	302,914 6	29,764 6
Equilibrio entre las fases sólida y líquida del indio (punto de congelación del indio)	429,748 5	156,598 5

Cuadro 2.A.2. Puntos de referencia secundarios y sus temperaturas en la EIT-90

Estado de equilibrio	Valor asignado en la EIT	
	K	°C
Equilibrio entre las fases sólida y de vapor del dióxido de carbono (punto de sublimación del dióxido de carbono) a la presión atmosférica de referencia p_0 (1 013,25 hPa)		
La temperatura t como función de la presión de vapor del dióxido de carbono viene dada por la ecuación:		
$t = [1,210\ 36 \cdot 10^{-2} (p - p_0) - 8,912\ 26 \cdot 10^{-6} (p - p_0)_2 - 78,464] \text{ °C}$		
donde p es la presión atmosférica en hPa, en el intervalo de temperaturas de 194 a 195 K	194,686	-78,464
Equilibrio entre las fases sólida y líquida del mercurio (punto de congelación del mercurio) a la presión atmosférica de referencia	234,296	-38,854
Equilibrio entre el hielo y el agua saturada de aire (punto de hielo) a la presión atmosférica de referencia	273,150	0,00
Equilibrio entre las fases sólida, líquida y de vapor del fenoxibenceno (difenil éter) (punto triple del fenoxibenceno)	300,014	26,864

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Andersson, T. e I. Mattison, 1991: *A Field Test of Thermometer Screens*. Informe del Instituto de Meteorología e Hidrología de Suecia RMK núm. 62, Norrköping.
- Comisión Electrotécnica Internacional, 2008: *Industrial Platinum Resistance Thermometers and Platinum Temperature Sensors*, IEC 60751:2008. Ginebra.
- Jones, E. B., 1992: *Jones' Instrument Technology*. Volumen 2: "Measurement of temperature and chemical composition". Butterworths-Heinemann, Oxford.
- Middleton, W. E. K. y A. F. Spilhaus, 1960: *Meteorological Instruments*. University of Toronto Press.
- Oficina de Publicaciones de Su Majestad/Oficina Meteorológica, 1980: *Handbook of Meteorological Instruments*. Volumen 2: "Measurement of temperature". Londres.
- Oficina Internacional de Pesas y Medidas, 1989: *Procès-Verbaux du Comité International des Poids et Mesures*. 78º período de sesiones, 1989, París (disponible en: <http://www.bipm.org/utils/common/pdf/its-90/ITS-90.pdf>).
- Oficina Internacional de Pesas y Medidas/Comité Consultivo de Termometría, 1990: "The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)" (H. Preston Thomas), en *Metrologia*, núm. 27, págs. 3 a 10 (versión enmendada) (disponible en: http://www.bipm.org/utils/common/pdf/its-90/ITS-90_metrologia.pdf).
- Organización Internacional de Normalización, 2007: *Meteorology – Air Temperature Measurements – Test Methods for Comparing the Performance of Thermometer Shields/Screens and Defining Important Characteristics*, ISO/DIS 17714: 2007. Ginebra.
- Organización Meteorológica Mundial, 1972: *The Effect of Thermometer Screen Design on the Observed Temperature* (W. R. Sparks) (WMO-No. 315). Ginebra.
- , 1992: *Measurement of Temperature and Humidity: Specification, Construction, Properties and Use of the WMO Reference Psychrometer* (R. G. Wylie and T. Lalas). Technical Note No. 194 (WMO-No. 759). Ginebra.
- , 1998a: *Recent Changes in Thermometer Screen Design and their Impact* (A. Barnett, D. B. Hatton and D. W. Jones). Instruments and Observing Methods Report No. 66 (WMO/TD-No. 871). Ginebra.
- , 1998b: "An investigation of temperature screens and their impact on temperature measurements" (J. Warne), en *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-98)*. Instruments and Observing Methods Report No. 70 (WMO/TD-No. 877). Ginebra.
- , 1998c: "A thermometer screen intercomparison" (J. P. van der Meulen), en *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-98)*. Instruments and Observing Methods Report No. 70 (WMO/TD-No. 877). Ginebra.
- , 1998d: "Comparison of meteorological screens for temperature measurement" (G. Lefebvre), en *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-98)*. Instruments and Observing Methods Report No. 70 (WMO/TD-No. 877). Ginebra.
- , 2000a: "A comparison of air temperature radiation screens by field experiments and computational fluid dynamics (CFD) simulations" (A. Spetalen, C. Lofseik y P. Ø. Nordli), en *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000)*. Instruments and Observing Methods Report No. 74 (WMO/TD-No. 1028). Ginebra.
- , 2000b: "Temperature measurements: Some considerations for the intercomparison of radiation screens" (J. P. van der Meulen), en *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2000)*. Instruments and Observing Methods Report No. 74 (WMO/TD-No. 1028). Ginebra.
- , 2002a: "Measurement of temperature with wind sensors during severe winter conditions" (M. Musa, S. Suter, R. Hyvönen, M. Leroy, J. Rast y B. Tammelin), en *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002)*. Instruments and Observing Methods Report No. 75 (WMO/TD-No. 1123). Ginebra.
- , 2002b: "Norwegian national thermometer screen intercomparison" (M. H. Larre y K. Hegg), en *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002)*. Instruments and Observing Methods Report No. 75 (WMO/TD-No. 1123). Ginebra.

- , 2002c: “Results of an intercomparison of wooden and plastic thermometer screens” (D. B. Hatton), en *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002)*. Instruments and Observing Methods Report No. 75 (WMO/TD-No. 1123). Ginebra.
- , 2002d: “Temperature and humidity measurements during icing conditions” (M. Leroy, B. Tammelin, R. Hyvönen, J. Rast y M. Musa), en *Papers Presented at the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation (TECO-2002)*. Instruments and Observing Methods Report No. 75 (WMO/TD-No. 1123). Ginebra.
- , 2011: *WMO Field Intercomparison of Thermometer Screens/Shields and Humidity Measuring Instruments* (M. Lacombe, D. Bousri, M. Leroy and M. Mezred). Instruments and Observing Methods Report No. 106 (WMO/TD-No. 1579). Ginebra.
- Sparks, W. R., 1970: “Current concepts of temperature measurement applicable to synoptic networks”, en *Meteorological Monographs*, vol. 11, núm. 33, págs. 247 a 251.
- , 2001: *Field trial of Metspec screens. Technical Report TR19*, Met Office/OD, Wokingham (Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte).
- Zanghi, F., 1987: *Comparaison des Abris Météorologiques*. Memorando técnico N° 11, Météo-France/ Servicio de equipos y de técnicas instrumentales para aplicaciones meteorológicas (SETIM), Trappes.
-