

INTI-CID  
151  
Y

Boletín Técnico N° 17



**Instituto  
Nacional de  
Tecnología  
Industrial**



**Organismo Descentralizado de la Secretaría de Estado de Desarrollo Industrial**

# Calibración y uso de termómetros de vidrio

• T. R. Suguer

1975

INTI-CID

151

Y

Boletín Técnico N° 17



**Instituto Nacional  
de Tecnología Industrial**

**Organismo Descentralizado de la  
Secretaría de Estado de Desarrollo Industrial**



# **Calibración y uso de termómetros de vidrio**

T. R. Suguer\*

\* Departamento de Física del INTI

1975

0828

# Indice

Pag.

Introducción .....	7
1. LA ESCALA INTERNACIONAL DE TEMPERATURAS .....	9
2. TERMOMETROS DE VIDRIO .....	13
2.1. Características .....	13
2.2. Tipos de termómetros .....	14
2.3. Termómetros para usos especiales .....	15
2.4. Definiciones referidas a termómetros de vidrio .....	16
3. DISEÑO DE UN TERMOMETRO .....	17
3.1. Vidrios .....	17
3.2. Líquidos termométricos .....	18
3.3. Llenado de gas .....	19
3.4. Escalas .....	19
3.4.1. Ubicación de la escala .....	19
3.4.2. Diseño y dimensiones de una escala .....	20
4. DEFECTOS DE UN TERMOMETRO DE VIDRIO .....	23
4.1. Inspección de la escala del termómetro .....	23
4.2. Inspección de la columna de líquido termométrico .....	23
4.2.1. Burbujas de gas en el bulbo .....	23
4.2.2. Burbujas de gas en la cámara de contracción .....	24
4.2.3. Columna dividida .....	24
4.2.4. Restos de Hg en las paredes de las cámaras de contracción y expansión .....	25
4.3. Impurezas en el agujero del tubo capilar .....	25
5. FACTORES QUE INTRODUCEN ERRORES EN LA INDICACION DE UN TERMOMETRO DE VIDRIO .....	27
5.1. Error de cero .....	28
5.1.1. Depresión temporal del cero .....	28
5.1.2. Aumento secular del cero .....	29
5.2. Correcciones debidas a variaciones de la presión externa e interna .....	29
5.2.1. Cambios en la indicación de un termómetro debido a variaciones en la presión externa .....	30
5.2.2. Cambios en la indicación de un termómetro debido a variaciones en la presión interna .....	31
5.3. Retardo .....	32
5.3.1. Temperatura del baño constante .....	32
5.3.2. Temperatura del baño variando en forma uniforme .....	34
5.4. Error por columna emergente .....	36
5.4.1. Corrección por columna emergente en un termómetro de inmersión total .....	37
5.4.2. Coeficiente relativo de expansión cúbica .....	40
5.4.3. Corrección por columna emergente en un termómetro de inmersión parcial .....	41
5.4.4. Casos particulares .....	44
6. CALIBRACION DE UN TERMOMETRO DE VIDRIO .....	47
6.1. Corrección de la escala, corrección reducida y corrección del 0°C .....	47
6.2. Prueba de estabilidad .....	48

6. 3.	Elección de los puntos de calibración sobre la escala del termómetro .....	49
6. 4.	Calibración de un termómetro de vidrio: Determinación del $C_e$ .....	49
6. 5.	Tolerancia y exactitud .....	52
6. 5. 1.	Tolerancia .....	52
6. 5. 2.	Exactitud .....	53
6. 6.	Calibración de un termómetro de inmersión parcial .....	54
7.	TERMOMETROS PARA USOS ESPECIALES .....	57
7. 1.	Termómetros Beckmann .....	57
7. 1. 1.	Calibración de un termómetro Beckmann .....	59
7. 1. 2.	Determinación de las correcciones de $C_e$ en las indicaciones de un termómetro Beckmann de inmersión total en otros rangos de temperatura .....	61
7. 1. 3.	Calibración de un termómetro Beckmann de inmersión parcial .....	63
7. 1. 4.	Correcciones por columna emergente .....	66
7. 1. 5.	Tolerancia y exactitud de un termómetro Beckmann .....	67
7. 2.	Termómetro de columna .....	68
7. 3.	Termómetros hipsométricos .....	69
7. 4.	Termómetros para calorímetros o calorimétricos .....	72
7. 5.	Termómetros clínicos .....	73
7. 6.	Termómetros industriales .....	74
8.	CALIBRACION DE UN TERMOMETRO DE VIDRIO A TEMPERATURAS SUPERIORES A 500°C .....	75
9.	CALIBRACION DE UN TERMOMETRO PATRON DE VIDRIO .....	79
10.	INFLUENCIA DE LAS DIMENSIONES DEL BULBO Y DEL DIAMETRO DEL AGUJERO DEL TUBO CAPILAR SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE UN TERMOMETRO DE VIDRIO .....	83
11.	RECOMENDACIONES PARA EL USO CORRECTO DE TERMOMETROS DE VIDRIO .....	85
12.	PUNTOS FIJOS, BAÑOS DE COMPARACION Y HORNOS ELECTRICOS .....	87
12. 1.	Punto fijo del hielo .....	87
12. 2.	Punto fijo de ebullición del agua .....	88
12. 3.	Baños de comparación .....	89
12. 3. 1.	Baño para bajas temperaturas .....	89
12. 3. 2.	Baños para temperaturas comprendidas entre 0°C y 250°C .....	90
12. 3. 3.	Baño de sales .....	91
12. 4.	Hornos eléctricos .....	91
	APENDICE .....	93
	BIBLIOGRAFIA .....	97

## Introducción

Sin lugar a dudas, la medición de temperaturas plantea hoy, un conjunto de problemas interesantes y de gran importancia práctica, tanto para la ciencia como para la industria. Ello trae aparejado, por un lado, el constante perfeccionamiento de las técnicas de medición y, por otro, la necesidad de contar con sensores de temperatura adecuados para dichos fines.

Por varias razones el termómetro de vidrio-líquido, más conocido por termómetro de vidrio, es, por su relativa sencillez, el sensor de temperaturas más ampliamente utilizado; no requiere ningún instrumental auxiliar, su precisión y exactitud son relativamente grandes dentro del rango de temperaturas que cubre y no es necesario que el usuario sea poseedor de una gran experiencia personal para efectuar mediciones con el mismo; ello, no obstante ser elementos frágiles y por lo tanto de fácil rotura. Sin embargo, como todo instrumento de medición, tiene sus limitaciones que obviamente deberán ser tomadas en cuenta para evitar gruesos errores, incompatibles con la precisión deseada.

La literatura existente en idioma castellano, referida a este tema, es escasa y es en general a nivel informativo. Tal situación indujo al autor a escribir estas notas para tratar de compensar, aunque sea parcialmente, este vacío.

"Calibración y uso de termómetros de vidrio" cubre varios capítulos que abarcan, en general, diferentes tópicos en su mayor parte ejemplificados numéricamente, y está dedicado a aquéllos que de algún modo tienen que hacer uso de este tipo de sensor.

En el primer capítulo se trata en forma muy somera la definición de la I. P. T. S. (68), mientras que en el capítulo 2 se entra en el tema específico por medio de una serie de definiciones y descripciones de los principales termómetros que se construyen actualmente.

Los capítulos 3 y 10 se refieren al diseño de los termómetros de vidrio, haciendo

hincapié en los materiales empleados en su construcción (capítulo 3) y en las dimensiones óptimas de los mismos (capítulo 10). Los defectos que suelen aparecer durante su construcción y la forma de subsanarlos, cuando ello es posible, son mencionados en el capítulo 4.

El capítulo 5 es muy importante. Allí se analizan los distintos factores que introducen errores en las indicaciones de un termómetro de vidrio.

Las técnicas empleadas actualmente en la calibración de los diferentes tipos de termómetros y que han sido adoptadas por la mayoría de los laboratorios especializados del mundo, son bosquejadas en el capítulo 6 al 9, mientras que en el capítulo 11 se dan una serie de reglas a las que el usuario deberá ajustarse, en lo posible, para efectuar mediciones de temperatura con alguna exactitud. Finalmente, en el capítulo 12 se describe cómo establecer los distintos puntos fijos y la construcción de baños de comparación y hornos eléctricos empleados en la calibración de estos termómetros.

En atención a que una gran cantidad de sensores de temperatura, hoy en uso en nuestro país, han sido calibrados con referencia a la I. P. T. S. (48) se ha agregado en el apéndice una tabla que permitirá realizar las correcciones necesarias para referirlos a la I. P. T. S. (68). Se acompaña, además, una extensa bibliografía a la que el lector interesado en obtener mayor información específica puede recurrir.

Gran parte de este trabajo está dedicado a los fabricantes locales de termómetros de vidrio, con los cuales se ha conversado en forma exhaustiva sobre el tema, especialmente en lo que atañe a la selección de los materiales adecuados para su construcción, así como a las técnicas empleadas para su calibración. Por ello, si con estas notas se contribuye a perfeccionar por un lado la calidad de los termómetros de vidrio nacionales, y por otro a mejorar las técnicas de medición de temperaturas realizadas con los mismos, el autor se da por muy satisfecho. Esta es, además, su única pretensión.

T. R. S.

## 1. La Escala Internacional de Temperaturas

La escala fundamental de temperaturas es la temperatura termodinámica  $T$ , cuya unidad, el kelvin (K) "es la fracción  $1/273,16$  de la temperatura termodinámica del punto triple del agua" (XIIIa. Conferencia General de Pesas y Medidas, 1967, Resolución 4), es decir:

$$1 \text{ K} = \frac{T_{\text{tr}}}{273,16}$$

La temperatura Celsius  $t$  se define, en cambio, a partir de la relación :

$$t = T - T_0$$

en donde  $T_0 = 273,15 \text{ K}$ , es el valor de la temperatura termodinámica del punto de fusión del hielo. Su unidad, el grado Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) es numéricamente igual al kelvin.

La dificultad de orden práctico que representa la realización de la escala termodinámica, condujo a la Conferencia General de Pesas y Medidas reunida en el año 1927 a superar esta situación mediante la definición de una nueva escala de temperaturas a la que designó con el nombre de Escala Internacional de Temperaturas. Esta, con ciertas modificaciones que se realizaron principalmente en los años 1948 y 1968 con el fin de adecuarla a las exigencias del momento, dio origen a la actual Escala Internacional Práctica de Temperaturas del año 1968 (en adelante I. P. T. S. (68) [1] [2]).

La I. P. T. S. fue definida para reemplazar en forma práctica a la escala termodinámica y su importancia reside en su reproducibilidad antes que en su exactitud. De todas formas, las diferencias entre ambas escalas están hoy dentro de los límites de exactitud de las medidas.

La I. P. T. S. (68) distingue entre la Escala Internacional Práctica de Temperatura Kelvin, simbolizada con  $T_{68}$  y la Escala Internacional Práctica de Temperatura

Celsius, simbolizada con  $t_{68}$ , existiendo entre ambas la relación :

$$t_{68} = T_{68} - 273,15$$

Las unidades de  $T_{68}$  y  $t_{68}$  son el kelvin (K) y el grado Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) respectivamente, como en el caso de la temperatura termodinámica  $T$  y la temperatura Celsius  $t$ . Esta escala está basada fundamentalmente en las temperaturas correspondientes a doce estados de equilibrio reproducibles, denominados puntos fijos de definición, a los que se les ha asignado valores numéricos sobre la base de mediciones realizadas por termómetros de gas. Determinadas fórmulas permiten, además, calcular por interpolación las temperaturas comprendidas entre la de los puntos fijos a partir de las indicaciones de ciertos instrumentos especificados que han sido calibrados en los mismos. Estos puntos fijos de definición y sus valores asignados en la I. P. T. S. (68) se presentan en la tabla 1. 1.

Tabla 1. 1. - Puntos fijos de definición de la I. P. T. S. (68)

Temperaturas asignadas		Estado de Equilibrio
$T_{68}$ (K)	$t_{68}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	
1 337, 58	1 064, 43	Punto de solidificación del oro
1 235, 08	961, 93	Punto de solidificación de la plata
692, 73	419, 58	Punto de solidificación del zinc
505, 118 1	231, 968 1	Punto de solidificación del estaño
373, 15	100	Punto de ebullición del agua
273, 16	0, 01	Punto triple del agua
90, 188	- 182, 962	Punto de ebullición del oxígeno
54, 361	- 218, 789	Punto triple del oxígeno
27, 102	- 246, 048	Punto de ebullición del neón
20, 28	- 252, 87	Punto de ebullición del hidrógeno
17, 042	- 256, 108	Equilibrio entre las fases líquidas y gaseosas del hidrógeno a una presión de 33 330, 6 N/m <sup>2</sup>
13, 81	- 259, 34	Punto triple del hidrógeno

El instrumento utilizado para definir a la I. P. T. S. (68) entre 13, 81 K y  $0^{\circ}\text{C}$ , así como entre  $0^{\circ}\text{C}$  y  $630,74^{\circ}\text{C}$ , es la resistencia de platino cuyas características deben cumplir con ciertas condiciones especificadas [1] [2]. La fem de una termocupla de Pt-Pt 10% Rh define el rango de interpolación entre 630, 74 y el punto de solidificación del oro ( $1\,064,43^{\circ}\text{C}$ ). Por encima de esta temperatura, la escala está definida a través del empleo de la fórmula de radiación de Plank, en la concentración espectral de un cuerpo negro.

Aparte de los ya detallados puntos fijos de definición, se han recomendado otros puntos fijos, denominados secundarios (tabla 1. 2.).

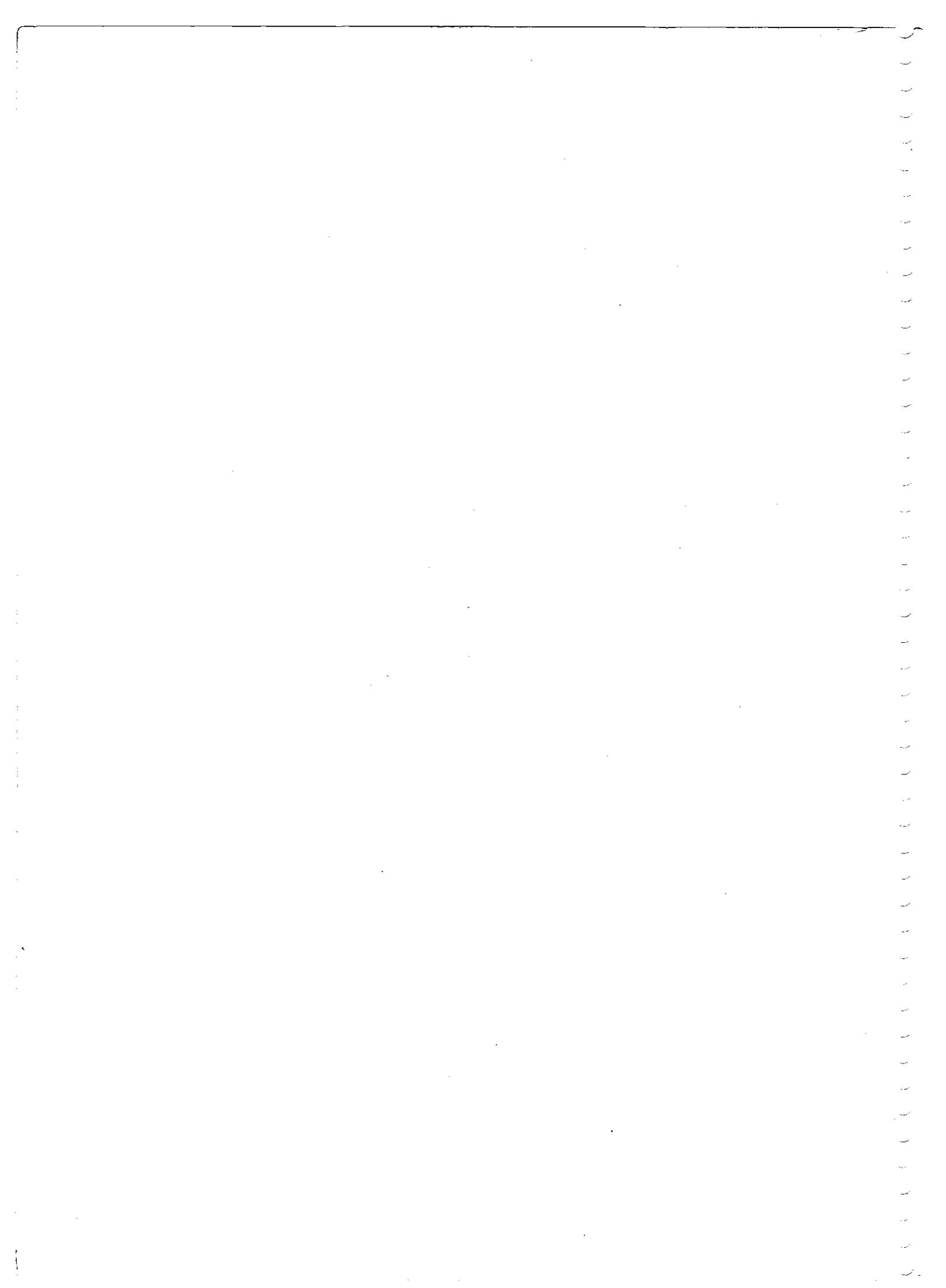
En algunos países, la escala de temperaturas adoptada es la escala Fahrenheit, simbolizada con  $t_F$  y cuya unidad es el grado Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ). En esta escala, se asigna el valor de  $32^{\circ}\text{F}$  al punto de fusión del hielo y de  $212^{\circ}\text{F}$  a la temperatura de ebullición del agua pura. Entre la temperatura Fahrenheit ( $t_F$ ) y la temperatura Celsius ( $t_{68}$ ) de la escala Celsius, existe la siguiente relación :

$$t_{68} = \frac{5}{9} (t_F - 32) \quad \text{o bien} \quad t_F = \frac{9}{5} t_{68} + 32$$

Tabla 1. 2. - Puntos fijos secundarios de la I. P. T. S. (68)

Temperaturas asignadas		Estado de Equilibrio
T <sub>68</sub> (K)	t <sub>68</sub> (°C)	
3 660	3 387	Punto de fusión del tungsteno
2 720	2 447	Punto de solidificación del iridio
2 236	1 963	Punto de solidificación del rodio
2 045	1 772	Punto de solidificación del platino
1 827	1 554	Punto de solidificación del paladio
1 767	1 494	Punto de solidificación del cobalto
1 728	1 455	Punto de solidificación del níquel
1 357, 6	1 084, 5	Punto de solidificación del cobre
933, 52	660, 37	Punto de solidificación del aluminio
903, 89	630, 74	Punto de solidificación del antimonio
821, 38	548, 23	Punto de solidificación del eutect. Cu-Al
717, 824	444, 674	Punto de ebullición del azufre
629, 81	356, 66	Punto de ebullición del mercurio
600, 652	327, 502	Punto de solidificación del plomo
594, 258	321, 108	Punto de solidificación del cadmio
544, 592	271, 442	Punto de solidificación del bismuto
429, 784	156, 634	Punto de solidificación del indio
395, 55	122, 37	Punto triple del ácido benzoico
300, 02	26, 87	Punto triple del fenoxibenceno
273, 15	0	Punto del hielo
234, 288	- 38, 862	Punto de solidificación del mercurio
194, 674	- 78, 476	Punto de sublimación del CO <sub>2</sub>
77, 348	- 195, 802	Punto de ebullición del nitrógeno
63, 148	- 210, 002	Punto triple del nitrógeno
24, 555	- 248, 595	Punto triple del neón
20, 397	- 252, 753	Punto de ebullición del hidrógeno normal
13, 956	- 259, 194	Punto triple del hidrógeno normal





## 2. Termómetros de vidrio

### 2.1. CARACTERISTICAS

La figura 2.1. muestra las formas más conocidas de un termómetro de vidrio. Este instrumento, llenado con algún líquido al que denominaremos termométrico, tal como el Hg, tolueno, alcohol, etc., depende para su funcionamiento de los coeficientes de dilatación volumétrica del líquido y del vidrio con el cual está construido el termómetro. Este está constituido esencialmente, cualquiera sea su diseño, por las siguientes partes :

Bulbo : es un depósito de vidrio que contiene un volumen de líquido termométrico equivalente a un determinado número muy grande de grados de la escala de termómetro, usualmente 6 000°C.

Columna : es un tubo capilar por el cual el líquido termométrico se dilata o contrae de acuerdo con los cambios de temperatura que se producen sobre el termómetro.

Escala principal : una escala graduada en grados, y también en múltiplos y submúltiplos de grado.

Escala auxiliar : una pequeña escala que contiene esencialmente una temperatura de referencia, tal como el punto de 0°C o algún otro conveniente y que sirve para verificar el comportamiento del termómetro a través del tiempo.

Cámara de expansión : un pequeño ensanchamiento de la luz del tubo capilar situado en su extremo superior y que tiene una capacidad para alojar una determinada cantidad de líquido termométrico. Su existencia previene contra un exceso de presión que podría producirse en el gas inerte contenido por el termómetro como consecuencia de una dilatación del líquido termométrico.

Cámara de contracción : situada debajo de la escala principal o entre ésta y la escala auxiliar. Sirve para reducir la longitud del termómetro y también para preve-

nir la contracción de la columna de líquido termométrico dentro del bulbo.

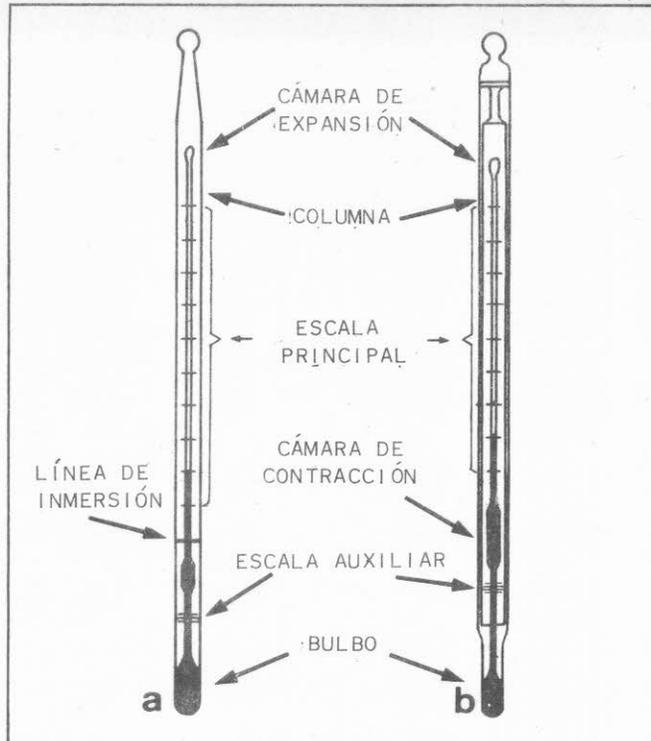


Figura 2. 1.

## 2. 2. TIPOS DE TERMOMETROS

Los termómetros de vidrio pueden ser utilizados en su faz operativa y según el tipo en tres formas posibles y desde este punto de vista se los designa con los siguientes nombres :

Termómetros de inmersión total : Son diseñados para indicar temperaturas correctas únicamente cuando el bulbo y la totalidad de la columna del líquido termométrico son expuestos a la misma temperatura.

Termómetros de inmersión parcial : Son diseñados para indicar temperaturas correctas cuando el bulbo y una parte especificada de la columna que se señala mediante una línea denominada línea de inmersión, se encuentran expuestos a la temperatura que se quiere determinar. La columna emergente permanece a temperatura ambiente.

Termómetros de inmersión completa : Indican temperaturas correctas cuando todo el termómetro, incluyendo la cámara de expansión, se encuentra expuesto a la misma temperatura.

Además, teniendo en cuenta la posición de la escala con respecto al tubo capilar, los termómetros pueden dividirse en dos clases :

Termómetros con escala externa : es decir, termómetros cuya escala se encuentra grabada directamente sobre la cara externa del tubo capilar (figura 2. 1. a.).

Termómetros con escala interna : en estos termómetros, el tubo capilar, que es de paredes muy finas, se encuentra sujeto a una lámina de vidrio, opalina o de cualquier material adecuado, sobre la cual se encuentra grabada la escala. El conjunto

Termómetros de columna : estos termómetros, más conocidos por termómetros "faden" en la literatura anglo-germana, son construidos con bulbos de distintas longitudes (de 5 cm a 20 cm) y paredes generalmente delgadas. Se emplean para determinar las temperaturas medias de las columnas emergentes de termómetros de inmersión total y parcial cuando es necesario realizar correcciones por columna emergente (ver apartado 5.4.).

Termómetros para calorímetros y calorimétricos : sus escalas están graduadas en intervalos de temperatura de 0,01°C ; 0,02°C ó 0,05°C y son utilizados para medir pequeñas diferencias de temperatura cuando se realizan determinaciones calorimétricas.

Termómetros para la medición de temperatura en las profundidades de lagos o mares : el principio de su funcionamiento es el siguiente ; cuando el termómetro alcanza la profundidad cuya temperatura se quiere medir, se invierte su posición mediante un movimiento mecánico. El Hg atraviesa, entonces, un pequeño estrechamiento que se encuentra situado por encima del bulbo, depositándose en otra columna. La longitud de Hg en esta última da una medida de la temperatura, después de haberse realizado las correcciones por efecto de la presión.

Algunos otros tipos de termómetros que se fabrican y del que solo haremos mención son :

Termómetros para medir viscosidades Engler, Stormer, Saybolt y cinemática.

Termómetros para ensayos de destilación de los productos del petróleo.

Termómetros para determinar puntos de inflamación.

Termómetros "pinchafrutas" o termómetros destinados a la medición de la temperatura interior en distintos tipos de frutas, etc.

#### 2.4. DEFINICIONES REFERIDAS A TERMOMETROS DE VIDRIO

Exactitud : Este concepto se refiere a la desviación del valor de la medida con respecto al verdadero valor de la temperatura sobre la I. P. T.-S. (68). Depende fundamentalmente de las características intrínsecas del propio termómetro, como ser, estabilidad del vidrio, uniformidad del capilar, graduación de la escala, entre otras.

Tolerancia : Es el máximo valor admitido que podrá desviarse la indicación del termómetro con respecto a la temperatura verdadera.

Precisión : Con este nombre nos referiremos a la repetibilidad de las indicaciones de un termómetro alrededor de algún valor medio, durante la medición de una misma temperatura. Es de notar que aunque los términos "Exactitud" y "Precisión" determinan finalmente la calidad de un termómetro, los mismos no son equivalentes. Efectivamente, un termómetro de gran precisión podría carecer de exactitud. Un ejemplo de esto último lo da el cambio de volumen del bulbo con el tiempo que se manifiesta en algunos termómetros después de haber sido calibrados, efecto que se ve traducido en un cambio del nivel de la columna de líquido termométrico. El termómetro, en este caso, podrá ser de gran precisión, pero carecer de exactitud.

Puntos de calibración : Son las temperaturas a las que se realizan las correcciones sobre la escala del termómetro.

Calibración : Operación que consiste en comparar las indicaciones del termómetro de vidrio, con temperaturas conocidas de alguna escala de referencia.

a su vez, se encuentra en el interior de un tubo de vidrio (figura 2.1.b.).

### 2.3. TERMOMETROS PARA USOS ESPECIALES

Aparte de los termómetros de vidrio, llamados químicos, de laboratorio o de uso común, cuya forma más general está representada en la figura 2.1., se diseñan y construyen otros termómetros para ser utilizados con fines diversos. Reciben el nombre generalizado de termómetros especiales. Algunos de ellos se mencionan a continuación :

Termómetros Beckman : son termómetros diseñados para medir con gran exactitud, diferencias de temperaturas. Una escala de  $5^{\circ}\text{C}$  o  $6^{\circ}\text{C}$  sirve a los propósitos del termómetro. Introduciendo o retirando mercurio del bulbo, es posible trabajar con ellos en distintos rangos de temperatura.

Termómetros de contacto : se emplean principalmente para regular la temperatura de baños y hornos eléctricos. Mediante un dispositivo fijo o regulable adosado al termómetro, se puede abrir o cerrar el circuito eléctrico de alimentación de aquéllos, cuando el termómetro indica una temperatura determinada.

Termómetros para hipsómetros o hipsotermómetros : sus escalas vienen graduadas en mm de Hg o en mbar y se emplean para medir la presión atmosférica a partir de la temperatura de ebullición del agua. Se utilizan en la misma forma que un termómetro común.

Termómetros de máxima : se emplean para determinar temperaturas máximas. El bulbo del termómetro posee en su extremo superior un pequeño estrechamiento que permite el pasaje de Hg cuando éste se dilata como consecuencia de un aumento de temperatura, pero evita su descenso, cuando una vez alcanzada la temperatura máxima, el termómetro se enfría y, como consecuencia de ello, el Hg comienza a contraerse.

Otro tipo de termómetro de máxima, es el termómetro de máxima con índice. Este, construido de acero, es colocado dentro del capilar en el espacio situado por encima del menisco de la columna de Hg. Cuando se produce un aumento de la temperatura, esta última arrastra simultáneamente al índice de acero, pero su posición permanece inalterada cuando una disminución de temperatura origina la contracción de la columna de Hg. Un imán permitirá, antes de realizar cualquier medición, colocar el índice en contacto con el menisco de la columna de Hg.

Termómetros de mínima : se emplean en la determinación de temperaturas mínimas. El líquido termométrico empleado es alcohol. Cuando se produce un descenso de la temperatura, el menisco de la columna de alcohol del termómetro arrastra consigo un pequeño índice de acero colocado en el capilar y sumergido en el alcohol. Cuando se produce, en cambio, un aumento de temperatura, la posición del índice no es afectada por la dilatación de la columna de alcohol. Estos termómetros son utilizados en posición horizontal.

Termómetros clínicos : el rango de la escala cubre  $7^{\circ}\text{C}$ , desde  $35^{\circ}\text{C}$  a  $42^{\circ}\text{C}$ . Funcionan en forma similar a los termómetros de máxima y son utilizados para medir la temperatura febril del cuerpo.

Termómetros de máxima y mínima : son termómetros de alcohol, cuyo capilar está doblado dos veces y en el que la columna de alcohol está interrumpida por una columna de Hg en cuyos extremos se encuentran dos índices de acero destinados a indicar las temperaturas máxima y mínima entre cada observación. Un pequeño imán, permite al comienzo de la medición, colocar los índices sobre los meniscos de la columna de Hg.

### 3. Diseño de un termómetro

Normalmente, el rango de temperatura sobre la I. P. T. S. (68) que es cubierto por el uso del termómetro de vidrio, se extiende desde los  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $630^{\circ}\text{C}$ , aunque ciertos termómetros de construcción especial pueden ser utilizados hasta los  $1\ 000^{\circ}\text{C}$ . Es evidente, entonces, que la elección de los diferentes materiales que se emplearán en la construcción de un termómetro de vidrio, dependerá del rango de temperaturas al que será destinado en su uso, así como de la precisión y exactitud deseadas. En general, deberán cumplirse ciertos requerimientos en la construcción de los termómetros de vidrio, y algunos de ellos se señalan a continuación.

#### 3.1. VIDRIOS

La elección del vidrio con el cual será construido el termómetro tiene una importancia fundamental para el futuro comportamiento del mismo.

Antes de proceder al grabado de la escala, es costumbre en la práctica, estabilizar el vidrio mediante un adecuado tratamiento térmico, exponiéndolo para ello a la temperatura máxima que será utilizado, durante un tiempo comprendido entre 10 y 30 horas. Esto permitirá eliminar las tensiones internas del vidrio, contribuyendo con ello al equilibrio de su estructura molecular. De otro modo, una inestabilidad del vidrio se traducirá en un cambio de sus indicaciones con el tiempo, sobre todo para termómetros cuya escala se extiende por sobre los  $200^{\circ}\text{C}$  [3]. La calidad del vidrio y el efecto producido por el tratamiento térmico podrán ser constatados por la estabilidad del punto de referencia de la escala auxiliar [4].

La tabla 3.1. detalla algunos vidrios de óptima calidad usados generalmente en la construcción de termómetros, sus fabricantes y las temperaturas máximas a las que podrán ser expuestos [5] [6] [7].

Tabla 3.1.

Vidrio	Fabricante	Temperatura máxima (°C)
Vidrio normal	Whitefriars Glass Ltd.	350
Vidrio normal dial	Plowden Thompson Ltd.	350
Vidrio normal gege-eff	Glaswerk-Gustav Fischer	350
Vidrio normal	Corning Glass Co.	350
Vidrio B 49 T	Cristalleries Verreries Réunies	350
Vidrio normal 16"	Jenaer Glaswerk Schott u Genossen	430
Vidrio normal N. W.	Glaswerk Wertheim	430
Vidrio N° 2 877	Jenaer Glaswerk Schott u Genossen	450
Vidrio de borosilicato	Whitefriars Glass Ltd.	460
Borosilicato de Corning	Corning Glass Co.	450
Vidrio de termómetro N° 2 954	Jenaer Glaswerk Schott u Genossen	480
Supremax (vidrio N°8409)	Jenaer Glaswerk Schott u Genossen	630
Cuarzo	Jenaer Glaswerk Schott u Genossen	1 000

### 3.2. LIQUIDOS TERMOMETRICOS

Existen diferentes clases de líquidos termométricos. Su elección, al igual que la del vidrio, dependerá del rango de temperatura a la que será destinado el termómetro durante su uso. Los líquidos termométricos más importantes son los líquidos no humectantes o metálicos, de los cuales el principal es el Hg. Varias ventajas concurren para ello :

- a) No humecta las paredes del capilar, por lo que cuando se produce un descenso de temperatura, toda la columna de Hg desciende.
- b) No requiere ningún colorante para ser visualizado.
- c) Puede ser utilizado en un amplio rango de temperaturas, pues solidifica a  $-38,86^{\circ}\text{C}$  y ebulle a los  $356,66^{\circ}\text{C}$ . Además, este rango podrá ser extendido a temperaturas superiores inyectando en el termómetro un gas inerte a varias atmósferas de presión (ver apartado 3.3.).

Otro líquido termométrico no humectante de uso difundido es la aleación de Hg - 8,7% Talio. De características físicas muy semejantes al Hg, presenta la desventaja de ser muy proclive a la oxidación, por lo que su uso queda restringido a termómetros cuyo rango de utilización se extiende desde  $-58^{\circ}\text{C}$  a  $30^{\circ}\text{C}$ .

Para rangos de temperatura que cubren temperaturas inferiores a  $-58^{\circ}\text{C}$  y en donde la utilización de Hg o de Hg - 8,7% Talio no es posible, se emplean líquidos orgánicos. Los más importantes son :

- Pentano, utilizado aproximadamente desde  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $30^{\circ}\text{C}$
- Alcohol, utilizado aproximadamente desde  $-110^{\circ}\text{C}$  a  $210^{\circ}\text{C}$
- Toluol, utilizado aproximadamente desde  $-90^{\circ}\text{C}$  a  $110^{\circ}\text{C}$

Los líquidos orgánicos presentan frente a los líquidos metálicos o no humectantes, algunas desventajas :

- a) Humectan las paredes del capilar, por lo que cuando se produce un descenso de temperatura, no desciende simultáneamente toda la columna de líquido orgánico.
- b) Necesitan colorantes para ser visualizados.

### 3.3. LLENADO DE GAS

Los termómetros de Hg graduados para ser utilizados a temperaturas superiores a 100°C, deberán tener el volumen del capilar situado por encima de la columna de Hg ocupado con algún gas inerte a presión, para prevenir la evaporización del Hg con el aumento de temperatura. El gas inerte, argón o nitrógeno, deberá estar libre de humedad y de oxígeno, y la presión de llenado requerida variará con la temperatura máxima que cubre la escala del termómetro, así como de su construcción. Se requiere cerca de una atmósfera de presión para 350°C, de 4 a 5 atmósferas para 450°C y aproximadamente 20 atmósferas para 550°C [8]. El llenado de gas para termómetros cuya escala no excede de 100°C es opcional, pero aconsejable.

### 3.4. ESCALAS

#### 3.4.1. Ubicación de la escala

Hemos visto en 2.2. que usualmente se construyen dos clases de termómetros de vidrio : termómetros con escala externa y termómetros con escala interna (figura 2.1.). En los primeros, la escala está grabada directamente sobre la cara externa de la columna del termómetro que se encuentra situada en dirección opuesta a la cara esmaltada, en donde, en general, se inscriben las características del termómetro, nombre del fabricante, número de serie, etc. La distancia existente entre la escala y el capilar es relativamente grande, por lo que en estos termómetros son comunes los errores de paralaje. En los termómetros con escala interna, la escala se encuentra grabada sobre una lámina alargada de vidrio, opalina, etc., sobre la cual se apoya el tubo capilar. Hay que evitar los posibles desplazamientos relativos entre la escala y el tubo capilar, para lo cual se adosa firmemente la lámina al tubo de vidrio exterior. Además, una pequeña marca grabada sobre este último, indica en todo momento la posición correcta de la escala. Obviamente, en estos termómetros, por ser la distancia que existe entre la escala y el capilar muy pequeña, los errores de paralaje son despreciables.

Las distancias mínimas que deben existir entre la escala y el bulbo, y entre la escala y las cámaras de expansión o de contracción, compatibles con un termómetro de buen diseño son [8] [9] [10] :

- a) 13 mm de longitud de capilar normal entre el bulbo y la graduación inferior de la escala, si dicha graduación tiene un valor de temperatura no mayor que 100°C ; 30 mm si es mayor que 100°C.
- b) 5 mm de longitud de capilar normal entre la graduación inferior de la escala y la cámara de contracción.
- c) 10 mm de longitud de capilar normal entre la cámara de expansión y la graduación superior de la escala, si dicha graduación tiene un valor de temperatura no mayor que 100°C ; 30 mm si es mayor que 100°C.
- d) 30 mm de capilar normal entre la graduación superior de la escala y el extremo superior del capilar, si no hay cámara de expansión.

### 3.4.2. Diseño y dimensiones de una escala

Las indicaciones de un termómetro de vidrio deberán poder leerse fácilmente. Para ello, el grabado de las divisiones de su escala tiene que reunir una serie de requisitos. En primer lugar, el ancho de las marcas, que son grabadas en forma perpendicular al eje longitudinal del termómetro, no tendrá que exceder la quinta parte de la distancia existente entre dos marcas consecutivas. Esta distancia no debe ser ni demasiado grande ni excesivamente pequeña. Ambos casos darán origen a errores apreciables en la lectura de las indicaciones del termómetro. Se considera que la mínima distancia existente entre dos marcas consecutivas no debe ser menor que 0,4 mm. El espaciamiento normal es de 0,7 mm.

El mínimo valor de temperatura que podrá grabarse sobre la escala tendrá que ser mayor que la temperatura de solidificación del líquido termométrico. La máxima temperatura, en cambio, no podrá exceder el valor de la máxima temperatura a que puede ser utilizado la clase de vidrio con que se construyó el termómetro y sobre el cual la escala está grabada.

La escala de un termómetro puede ser grabada en intervalos de temperaturas de 0,01°C ; 0,02°C ; 0,05°C ; 0,1°C ; 0,2°C ; 0,5°C ; 1°C ; 2°C ; 5°C ó 10°C, dependiendo del rango de temperaturas que cubre la misma, tal como puede apreciarse en la tabla 3.2. [11] .

Tabla 3.2.

Intervalo de temperatura °C	Rango de temperatura para :	
	Líquidos no humectantes	Líquidos humectantes
0,01	- 5°C a 60°C	-
0,02 - 0,05	- 5°C a 110°C	-
0,1	-58°C a 110°C	-
0,2	-58°C a 210°C	-
0,5	-58°C a 310°C	- 58°C a 110°C
1	-58°C a 625°C	-200°C a 210°C
2 - 5 - 10	desde -58°C	-200°C a 210°C

Los termómetros con escalas graduadas en intervalos de temperatura de 0,25°C introducen muchas dificultades en las lecturas de sus indicaciones y por ello tienden a desaparecer.

Si la escala principal carece de un punto de referencia fácil de verificar, tal como el 0°C o el punto de ebullición del agua (100°C), se deberá grabar sobre el termómetro una escala adicional denominada escala auxiliar, conteniendo algunas de las temperaturas mencionadas. Obviamente, las divisiones de esta escala tendrán que ser similares a las de la escala principal y deberá extenderse en un pequeño rango, por abajo y arriba del punto de referencia.

La disposición de las líneas grabadas sobre la escala del termómetro puede, en general, adoptar cualquiera de las formas siguientes :



a) Para termómetros con escala externa :

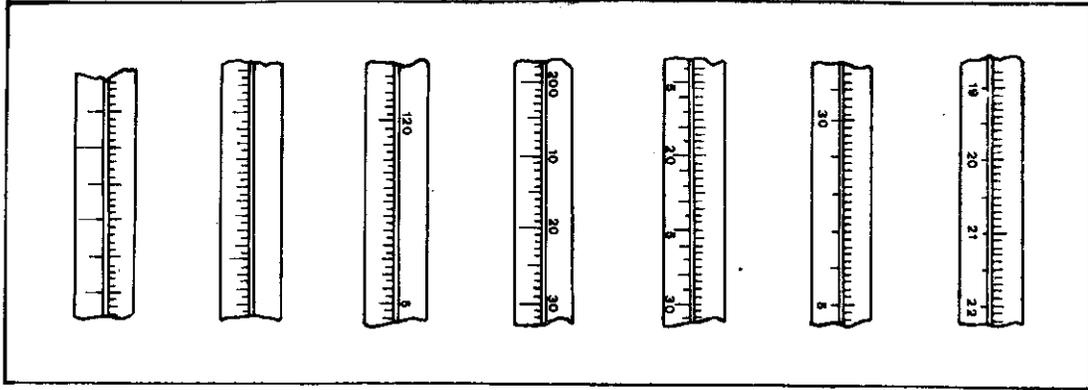


Figura 3. 1. a.

b) Para termómetros con escala interna ;

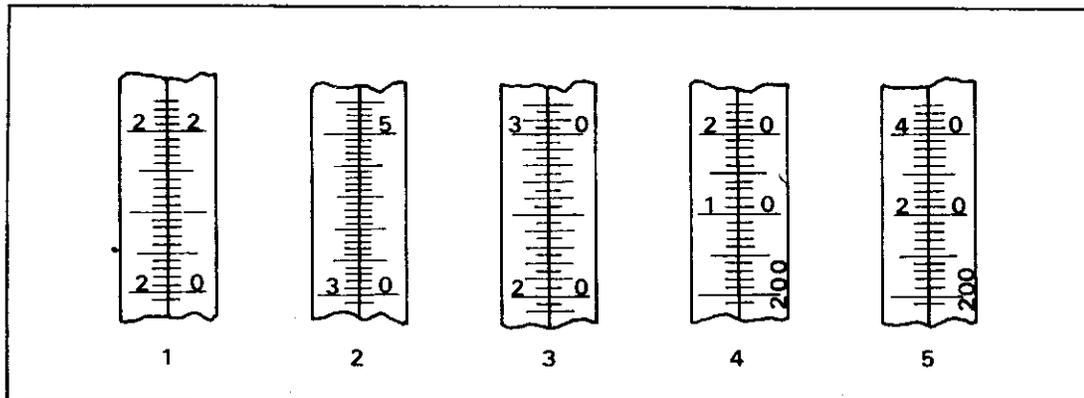
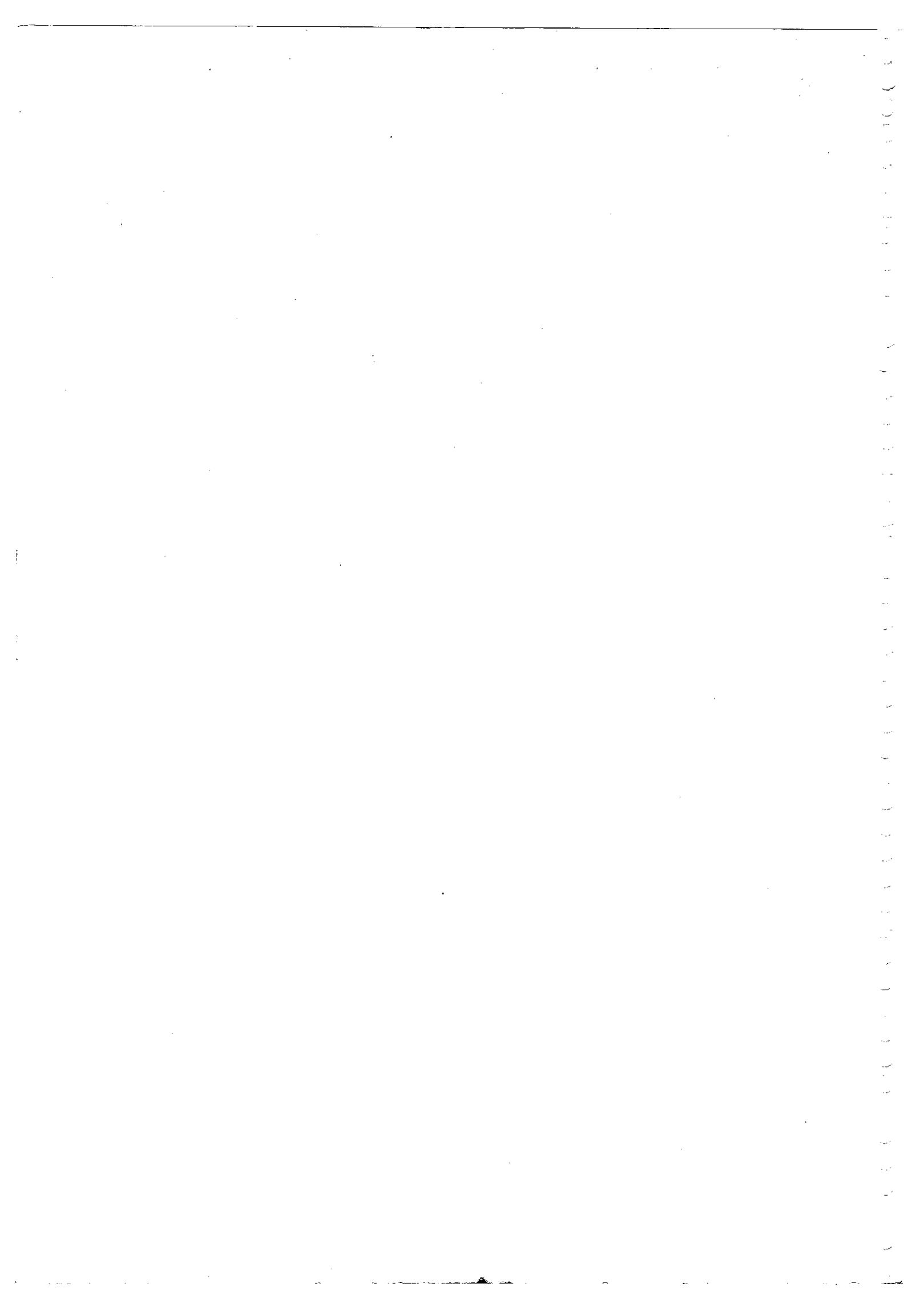


Figura 3. 1. b.



## 4. Defectos de un termómetro de vidrio

Es costumbre, antes de proceder a la calibración de un termómetro de vidrio, someterlo a una minuciosa inspección ocular, para detectar las fallas y defectos que el mismo pudiera tener. Esto se hace necesario a efectos de preservar, para el futuro, la validez de los valores de la calibración.

Ciertos defectos, algunas veces sólo visibles mediante la utilización de una lupa -tales como la existencia de suciedad o humedad dentro del capilar- podrían determinar su rechazo a los efectos de su calibración. Otros, en cambio, son susceptibles de ser eliminados mediante una serie de operaciones manuales que requerirán, en general, mucha paciencia y también alguna experiencia<sup>[12]</sup>.

### 4.1. INSPECCION DE LA ESCALA DEL TERMOMETRO

Se observarán las marcas y divisiones de la escala para verificar posibles defectos (por ejemplo, no uniformidad de las marcas, algunas más grandes o anchas que otras) y errores (por ejemplo, cuatro divisiones donde tendría que haber cinco) producidos durante el proceso de grabado de la escala sobre el termómetro.

### 4.2. INSPECCION DE LA COLUMNA DE LIQUIDO TERMOMETRICO

Para una inobjetable medida de temperatura utilizando el termómetro de vidrio, es necesario que la columna de líquido termométrico esté absolutamente libre de cualquier discontinuidad y constituya una sola unidad totalmente coherente. Las discontinuidades más comunes que suelen observarse por lo general en una inspección del líquido termométrico se detallan a continuación.

#### 4.2.1. Burbujas de gas en el bulbo (figura 4.1.a.)

Este defecto puede originarse durante el llenado del termómetro con un gas inerte, o bien por algún movimiento brusco realizado sobre él. Para eliminar el mismo, se enfriará el termómetro sumergiéndolo para ello en una mezcla muy fría, hasta

que todo el Hg se introduzca dentro del bulbo, permitiendo la liberación de las burbujas de gas. Si hubiese necesidad de solidificar el Hg se introducirá el termómetro en una adecuada mezcla fría, sosteniéndolo en posición vertical, libre de vibraciones hasta que las burbujas de gas se liberen. Luego se llevará el termómetro lentamente a temperatura ambiente, retirándolo del recipiente que contiene la mezcla fría por pasos; primero la columna y después de algunos minutos que ésta ha adquirido una temperatura cercana o igual a la del ambiente, el bulbo. De este modo se previene una posible rotura del bulbo, que podría producirse por el exceso de presión originada en la expansión del Hg al aumentar la temperatura bruscamente.

Las mezclas refrigerantes más generalmente usadas en estos casos son :

NaNO <sub>3</sub> - Hielo	hasta	- 18°C
Sal común - Hielo	hasta	- 21°C
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O - Hielo	hasta	- 50°C
CO <sub>2</sub> - Metanol enfriado	hasta	- 78°C

#### 4. 2. 2. Burbujas de gas en la cámara de contracción (figura 4. 1. b.)

Tienen un origen similar al citado en el apartado anterior y se eliminan enfriando el termómetro hasta que la columna de Hg haya descendido lo suficiente como para poder liberar las burbujas de gas.

#### 4. 2. 3. Columna dividida (figura 4. 1. c.)

Algunas veces este defecto puede ser eliminado, golpeando suavemente el termómetro con la mano, o bien mediante la aplicación de un método de centrifugación, especialmente en termómetros que carecen de un gas inerte a presión. De lo contrario se procederá a enfriar el termómetro hasta que todo el Hg se haya introducido dentro del bulbo. En estas circunstancias, se producirá la unión de todo el líquido termométrico, tomándose después todas las precauciones detalladas en 4. 2. 1. para llevar el termómetro a temperatura ambiente.

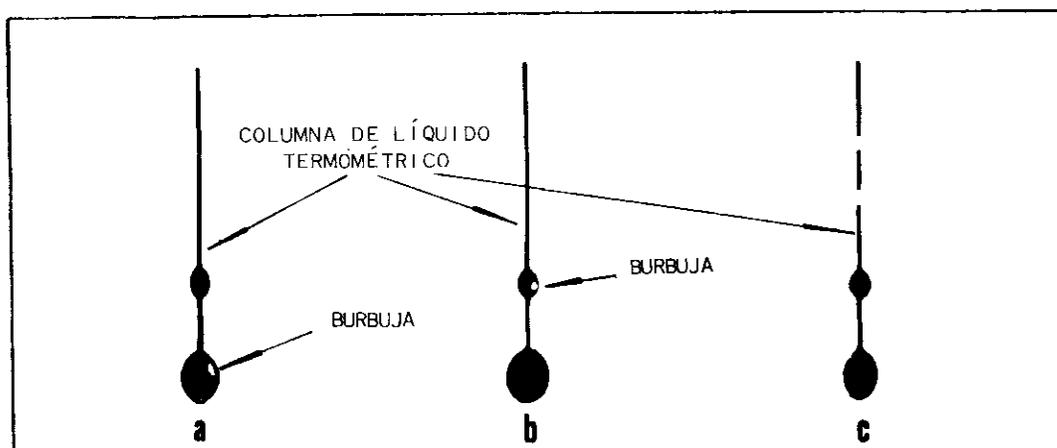


Figura 4. 1.

#### 4. 2. 4. Restos de Hg en las paredes de las cámaras de contracción y expansión.

Algunas veces durante la inspección del termómetro es posible encontrar pequeños restos de Hg adheridos a las paredes de una o ambas cámaras. En este caso el procedimiento usual es golpear suavemente el termómetro en un lugar de la columna coincidente con el ocupado por la cámara para permitir que los restos de Hg se unan formando una pequeña bolita que queda adherida por lo general a las paredes de la misma. Calentando luego el termómetro, se podrá lograr la unión de la bolita de Hg con la columna principal. Se deberá tomar alguna precaución para el caso de que la cámara sea la de expansión, evitando su llenado con Hg para prevenir que un exceso de presión pueda originar la rotura del termómetro.

#### 4. 3. IMPUREZAS EN EL AGUJERO DEL TUBO CAPILAR

Estas consisten, en general, en partículas extrañas o bien trazas de humedad, adheridas a las paredes del agujero del tubo capilar que dificultan y a veces impiden el paso de la columna de Hg. Este defecto, que es considerado como permanente, es originado por una deficiente elaboración durante el proceso de fabricación del termómetro, y cualquier mejora resulta ser, en general, de poca duración.

Si bien todo lo detallado hasta aquí se ha referido a termómetros de Hg, vale también para termómetros que utilizan como líquido termométrico, líquidos orgánicos. Dado que son empleados generalmente para medir bajas temperaturas, se tendrá que utilizar para enfriarlos, en algunos casos, aire u oxígeno líquido.



## 5. Factores que introducen errores en la indicación de un termómetro de vidrio

El valor de la medida de la temperatura tomada mediante un termómetro de vidrio, estará afectado de un error, como sucede con cualquier medición, por lo que en medidas que requieran alguna exactitud, deberá ser convenientemente evaluado.

Las principales fuentes de errores son las siguientes :

1. Error de cero
2. Variaciones de la presión externa
3. Variaciones de la presión interna
4. Error por columna emergente
5. Retardo

Definimos el error de una medida, como la diferencia :

$$E = t_i - t_v \quad (1)$$

en donde  $t_i$  es la temperatura que indica el termómetro durante la medición, y  $t_v$  es la temperatura verdadera, es decir, la temperatura que indicaría el termómetro, si la lectura estuviese libre de errores.

Definimos, en cambio, la corrección  $C$  de la temperatura indicada por el termómetro durante la medición, como :

$$C = -E \quad (2)$$

es decir, que tanto la corrección como el error de la medida tienen el mismo valor absoluto pero signo contrario. Comparando (1) con (2) se tendrá que :

$$t_v = t_i + C \quad (3)$$

o sea :

temperatura verdadera = temperatura indicada por el termómetro + corrección

## 5.1. ERROR DE CERO

En 3.1. se hizo notar que la necesidad de someter al vidrio de un termómetro a un adecuado tratamiento térmico, antes de proceder al grabado de su escala, obedece principalmente al intento de eliminar las tensiones internas en el mismo y contribuir al equilibrio de su estructura molecular, con el fin de obtener, en un determinado rango de temperaturas, la máxima estabilidad posible.

Sin embargo, ello no se logra completamente y como consecuencia se verifican variaciones en las indicaciones del termómetro a través del tiempo y uso del mismo. Esto último, puede ser constatado mediante la observación periódica de la indicación del termómetro en una temperatura reproducible y fácil de realizar, por ejemplo  $0^{\circ}\text{C}$  [8] [13] [14]. De allí el nombre de error de cero. (Si la escala no contiene a este último valor podrá tomarse cualquier otra temperatura adecuada).

Si bien estas variaciones se producen en todo el termómetro, el volumen de la luz del tubo capilar es despreciable comparado con el volumen del bulbo, por lo que es legítimo suponer "a priori" que las variaciones observadas en la indicación de un termómetro correspondiente a una temperatura de  $0^{\circ}\text{C}$  (o de cualquier otra temperatura adecuada) son debidas casi exclusivamente a variaciones en el volumen del bulbo. Esto último es importante y trae como consecuencia que los cambios en magnitud y signo de las indicaciones en los diferentes puntos de la escala del termómetro sean iguales a los cambios en la indicación del  $0^{\circ}\text{C}$  (o de cualquier otra temperatura adecuada). Esta condición no es estrictamente aplicable para termómetros cuyas escalas exceden de  $500^{\circ}\text{C}$ .

Las variaciones que originan el error de cero pueden ser de dos órdenes: Depresión Temporal y Aumento Secular, y ambos deberán ser tenidos en cuenta, no sólo en las medidas de precisión, sino aún en las ordinarias.

### 5.1.1. Depresión temporal del cero

Si con un termómetro de vidrio que ha permanecido a temperatura ambiente durante varios días, se mide una temperatura más alta, el termómetro alcanzará, al cabo de un cierto tiempo, un estado de equilibrio correspondiente a dicha temperatura (ver apartado 5.3.). Si una vez realizada la medición, el termómetro es llevado a temperatura ambiente en forma lenta (cerca de  $15^{\circ}\text{C}/\text{hora}$ ), la lectura del  $0^{\circ}\text{C}$  no mostrará ninguna variación [15]. Si se repite el procedimiento, pero esta vez llevando el termómetro a temperatura ambiente, enfriándolo en contacto directo con el aire y se realiza después una nueva lectura correspondiente a la temperatura de  $0^{\circ}\text{C}$ , se encontrará un valor menor. Este efecto, que desaparece por lo general:

- a) en una semana aproximadamente si la temperatura máxima a la que ha sido expuesto el termómetro no excedió de  $100^{\circ}\text{C}$ , y
- b) en un tiempo bastante más largo, si la temperatura máxima fuese mayor que  $200^{\circ}\text{C}$

se denomina depresión temporal, definiéndose este último término como la diferencia que existe entre la lectura del termómetro correspondiente a la temperatura de  $0^{\circ}\text{C}$ , antes e inmediatamente después que el termómetro ha sido expuesto a una temperatura determinada (usualmente  $100^{\circ}\text{C}$ ). Su valor es bastante reproducible, si el termómetro es enfriado en contacto directo con el aire.

La depresión temporal se origina por el hecho de que el termómetro, al ser enfriado rápidamente a temperatura ambiente, "recuerda" haber estado expuesto previamente a una temperatura superior, por lo que el volumen no se contraerá inmedia-

tamente, sino después de un cierto tiempo que dependerá de la composición del vidrio, de la velocidad con que ha sido enfriado y de la temperatura a la que estuvo expuesto.

El valor de la depresión temporal para un termómetro construido con vidrio normal 16" o similar, después de haber sido expuesto a una temperatura no mayor de 100°C, no excederá de 0,05°C, o bien, de 0,01°C a 0,03°C si el termómetro fuese construido con vidrio N° 2954 o Supremax. Si estos termómetros hubiesen sido expuestos a temperaturas mayores que 200°C, el valor de la depresión temporal podría llegar en algunos casos a ser de varias décimas de grado.

Este efecto puede ser disminuido notablemente si los termómetros son construidos con cuarzo. Efectivamente, estos termómetros expuestos a temperaturas superiores a 100°C presentan una depresión temporal que no excede de 0,001°C durante años, y sólo de 0,02°C cuando son utilizados a una temperatura de 600°C aún después de 100 horas de calentamiento [16].

Es evidente, por todo lo expresado, que el efecto de la depresión temporal habrá de tenerse en cuenta en todas las mediciones de temperatura, aunque el mismo podrá ser controlado si se procede de acuerdo con las prescripciones dadas en el capítulo 11.

#### 5.1.2. Aumento secular del cero

El bulbo de un termómetro de vidrio, usado o no, se contrae con el tiempo, originando un aumento en el valor de la lectura correspondiente a la temperatura de 0°C. Esta variación, que no excede de 0,01°C a 0,02°C después del primer año de manufacturado, puede llegar hasta 0,1°C transcurridos varios años, siempre que el termómetro no haya sido expuesto a temperaturas superiores a 150°C. Si éste fuera el caso, los cambios de volumen que se verifican en el bulbo son muy erráticos, razón por la cual los mismos no pueden ser predichos, aunque experimentalmente se encuentra que son mayores.

El aumento secular, tal como se denomina a esta variación, depende de la naturaleza del vidrio y del tratamiento térmico a que fue sometido el termómetro durante el proceso de fabricación. Si el tratamiento térmico no hubiese sido el adecuado, el aumento secular de un termómetro que es expuesto a altas temperaturas en forma continua, podría llegar a 10°C o aún más [17].

Las variaciones originadas por este efecto podrán ser determinadas mediante la observación, en el termómetro, de la indicación correspondiente a la temperatura de 0°C, de acuerdo a las prescripciones que se dan en conjunto en el capítulo 11. Esto último se hace necesario con el fin de asegurar que el estado del termómetro sea siempre el mismo, antes de proceder a la determinación del aumento secular para, de este modo, poder aplicar a los valores de las correcciones de la escala del termómetro que se suministran en su tabla de calibración, las correcciones adicionales originadas por este efecto. Esto es importante y por ello se aclarará ampliamente en capítulos posteriores.

#### 5.2. CORRECCIONES DEBIDAS A VARIACIONES DE LA PRESION EXTERNA E INTERNA

El vidrio con el cual se construye el termómetro y en especial su bulbo, no es absolutamente rígido, presentando además propiedades elásticas. Bajo estas condiciones, no es difícil suponer que sus indicaciones durante la medición de temperaturas van a depender tanto de la presión externa como de la presión interna por lo que, ambos factores deberán ser tenidos en cuenta en mediciones de precisión.

5.2.1. Cambios en la indicación de un termómetro debido a variaciones en la presión externa

Un aumento de la presión externa originará una contracción del volumen del bulbo y como consecuencia un incremento de la longitud de la columna de líquido termométrico, dando como resultado un valor erróneo de la medida de temperatura. En estas condiciones, la corrección que se aplicará sobre la indicación del termómetro será :

$$C_{pe} = - (p - p_0) \beta_e \quad (4)$$

en donde  $p$  es la presión externa que actúa sobre el bulbo y  $p_0$  es la presión atmosférica igual a 760 mm de Hg.  $\beta_e$  es el coeficiente de presión externa que se define como el cambio en grados Celsius que se observa en la lectura del termómetro, cuando la presión externa varía en 1 mm de Hg. Este coeficiente depende de las propiedades elásticas del vidrio con el cual fue construido el bulbo, así como de su diámetro y del espesor de las paredes. Guillaume [18] encontró para  $\beta_e$  una relación, que puede ser escrita de la siguiente forma :

$$\beta_e = K \frac{R_e^2}{R_e^2 - R_i^2} \quad (5)$$

en donde  $R_e$  y  $R_i$  constituyen el radio exterior e interior del bulbo respectivamente y  $K$  una constante que depende de las propiedades elásticas del vidrio y es además un factor de conversión que permite expresar el cambio de volumen del bulbo en términos del cambio de la indicación del termómetro expresado en grados Celsius. Su valor es igual a  $5,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C/mm de Hg}$ .

El cálculo de  $\beta_e$  puede ser realizado también gráficamente a partir de la figura 5.1. [19] .

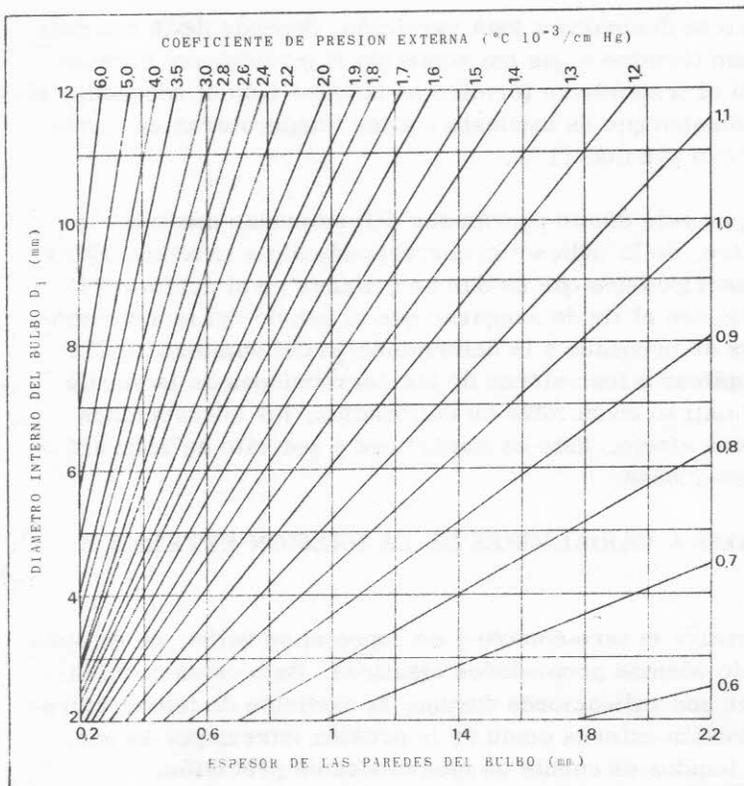


Figura 5.1  
Coeficiente de presión externa en función de las dimensiones del bulbo.

Valores experimentales de  $\beta_e$  han mostrado ser, sin embargo, en promedio, hasta un 25% más bajos que los deducidos por Guillaume [19], aunque en general para termómetros cuyos bulbos tienen un diámetro comprendido entre 5 mm y 7 mm, su valor no llegara exceder de 0,1°C/atm.

Las correcciones que se aplican sobre las indicaciones de un termómetro debido a las variaciones de la presión externa que actúan sobre el bulbo del mismo, se hacen muy importantes en termómetros cuya escala está graduada en intervalos de temperatura de 0,01°C ó 0,02°C y especialmente cuando se miden temperaturas en líquidos de alto peso específico. En tales casos, convendrá realizar una determinación experimental de  $\beta_e$  [18].

#### 5.2.2. Cambios en la indicación de un termómetro debido a variaciones de la presión interna

Cambios en la indicación de un termómetro pueden ser causados, también, por variaciones de la presión interna. Estas tienen su origen en dos efectos principales: en cambios en la presión capilar ejercida por el menisco del líquido termométrico y/o en cambios en la presión hidrostática ejercida por la columna de líquido termométrico o de la presión del gas inerte. Obviamente, estas variaciones se hacen apreciables en termómetros de Hg.

El primer efecto es importante en termómetros que tienen la luz del tubo capilar de muy pequeño diámetro. Ello por el siguiente motivo, cuando un termómetro de Hg es expuesto a una fuente de calor, el menisco de la columna se hace más convexo, incrementando con ello la presión capilar que actúa sobre las paredes del bulbo. Puesto que éstas no son absolutamente rígidas, su volumen aumenta a causa de esta sobrepresión hasta que la misma es igualada por la contrapresión originada por la fuerza restauradora de las paredes del bulbo. Cuando esto sucede, el menisco efectúa un salto de unas pocas milésimas de grado y se hace menos convexo. El proceso se repite mientras se entrega calor al termómetro, de modo que la columna de Hg no se mueve en forma continua sino por una serie de saltos. Este efecto, que tiene gran importancia en termómetros de alta precisión, puede ser disminuido si se agranda el diámetro del capilar y se construye el bulbo con diámetro pequeño y paredes gruesas (ver capítulo 10).

El coeficiente de presión interna  $\beta_i$  se define como el cambio en grados Celsius que se observa en la lectura del termómetro cuando la presión interna varía en un mm de Hg y su valor podrá ser deducido con gran aproximación a partir de la relación:

$$\beta_i = \beta_e + 1,5 \cdot 10^{-5} \quad (6)$$

expresión válida para termómetros cuyas escalas están graduadas en °C. Las variaciones en las indicaciones de un termómetro originadas por un cambio de la presión interna, suelen ser, en general, hasta un 10% mayores que las producidas por un cambio equivalente de la presión externa.

El segundo efecto, se pone de manifiesto de la siguiente forma: si un termómetro es sumergido en un baño cuya temperatura permanece constante, las indicaciones sobre su escala dependerán de su inclinación con respecto a la posición vertical, siendo el valor de las lecturas correspondientes a esta última posición, menores que las correspondientes a la primera. Esta diferencia es grande cuando se trata de termómetros de Hg y puede explicarse si se tiene en cuenta que cuando la posición del termómetro es vertical, se produce un aumento de la presión hidrostática ejercida por la columna de Hg que no sólo incrementa el volumen del bulbo, sino que comprime el Hg contenido dentro del mismo, lo que origina una disminución de la longitud de la columna de Hg. Debido a ello, cuando un termómetro que ha sido

calibrado para ser utilizado en posición vertical es utilizado, en cambio, en una posición distinta a esta última, sobre sus indicaciones habrá de aplicarse la siguiente corrección :

$$C_{pi} = - \beta_i L (1 - \cos \alpha ) \quad (7)$$

donde L es la longitud de la columna de Hg en el momento de la observación y  $\alpha$  el ángulo que forma el termómetro con la vertical. Para el caso particular que  $\alpha = 90^\circ$ , es decir, que el termómetro sea colocado en posición horizontal, la expresión (7) quedará reducida aproximadamente a :

$$- L \ 0,000 \ 15^\circ\text{C}/\text{mm}$$

valor que, en general, no excederá de  $- 0,05^\circ\text{C}$ .

$\beta_i$  puede determinarse experimentalmente, mediante la observación de las indicaciones de un termómetro, introducido en un baño que se mantiene a temperatura constante, por ejemplo  $100^\circ\text{C}$ , colocado primero en posición vertical y luego horizontal.

Un efecto similar se presenta en el caso de que la cámara de expansión de un termómetro de Hg llenado con algún gas inerte sea expuesto a una temperatura excesiva. Bajo estas condiciones se producirá un incremento de la presión del gas y como consecuencia, de la presión hidrostática que actúa sobre las paredes del bulbo, dando origen a un aumento del volumen de este último.

No existe una expresión analítica para la corrección que deberá aplicarse a la indicación de un termómetro afectado por estas condiciones de uso. La única solución es tratar de dar al termómetro un empleo correcto.

### 5.3. RETARDO

Si se introduce un termómetro de vidrio que se encuentra a la temperatura  $\theta$  en un baño de comparación (ver apartado 12.3.) a la temperatura  $\theta_b$ , se establecerá entre ambos un intercambio de calor. La variación de la indicación del termómetro en la unidad de tiempo será directamente proporcional a la diferencia de temperatura que existe entre el termómetro y el medio que lo rodea y estará dada por la relación :

$$\frac{d\theta}{dt} = - \frac{1}{\tau} (\theta - \theta_b) \quad (8)$$

donde  $\tau$  es la constante de tiempo o retardo, según se aclara más adelante.

En la práctica, generalmente se presentan dos casos de interés : que la temperatura del baño de comparación se mantenga constante durante la medición, o bien que varíe en forma uniforme con el tiempo.

#### 5.3.1. Temperatura del baño constante

Si se cumple esta condición, la ecuación (8) tiene como solución a la expresión :

$$\theta_t = \theta_b - (\theta_b - \theta_i) e^{-t/\tau} \quad (9)$$

que significa que el termómetro no adquiere la temperatura del baño en forma instantánea, sino que tiende a ella en forma asintótica, tal como puede observarse en la figura 5.2.

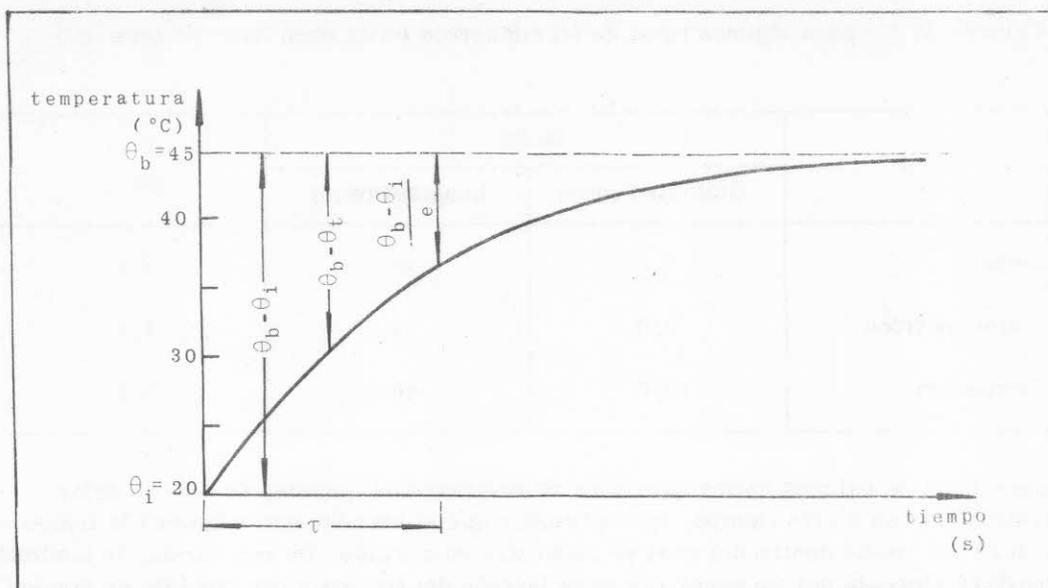


Figura 5.2

En la expresión (9),  $\theta_t$  es la temperatura que posee el termómetro, transcurrido un cierto tiempo  $t$  después de haber sido introducido dentro del baño;  $\theta_i$  es la temperatura que poseía el termómetro en el tiempo  $t = 0$ , es decir, en el momento de ser introducido dentro del baño; y  $\theta_b$  es la temperatura de este último.  $\tau$  es una constante denominada constante de tiempo o retardo y cuantitativamente es el tiempo necesario para que la diferencia de temperatura  $\theta_b - \theta_t$  sea igual a :

$$\frac{\theta_b - \theta_t}{e} \cong 0,37 (\theta_b - \theta_i)$$

Esta constante, depende del tipo de termómetro, de las características del medio y de la velocidad con que este último se mueve con respecto al termómetro. La tabla 5.1. muestra algunos valores de  $\tau$  característicos para tres medios diferentes.

Tabla 5.1.

Valores de  $\tau$  expresados en segundos para varias velocidades de tres medios diferentes con respecto a un termómetro común de bulbo pequeño 20 .

Veloc. del medio con respecto al bulbo en cm/s	0	1	5	10	50	100	500	1 000	$\infty$
Agua	10,0	5,1	3,3	2,9	2,4	2,3	-	-	2,2
Aceite	40 a 50	13,4	7,5	6,4	4,8	-	-	-	
Aire	190	170	148	128	71	58	33	25	



Valores de  $\tau$  para algunos tipos de termómetros en un buen baño de agua [20]

Tipo	Bulbo		$\tau$ (s)
	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	
Común	4,5	25	2,1
Calorimétrico	9,0	52	4,8
Beckmann	13,0	40	8,7

Esta serie de valores indica que antes de realizar una medida, se deberá dejar transcurrir un cierto tiempo, para permitir que el termómetro adquiera la temperatura del medio dentro del cual se encuentra sumergido. De otro modo, la medición quedará afectada por un error que será función del tiempo y que por ello se denomina transitorio. Se define, entonces, el error transitorio de la indicación de un termómetro sumergido en un medio que se encuentra a la temperatura constante  $\theta_b$  como :

$$E(t) = \frac{\theta_b - \theta_t}{\theta_b - \theta_i} = e^{-t/\tau} \quad (10)$$

expresión que puede deducirse de (9). La figura 5.2. es una representación gráfica de la expresión (10) para diferentes valores de  $\tau$ , habiéndose representado en el eje de las ordenadas, el  $\log E(t)$  y en el eje de las abscisas el tiempo  $t$  [21].

El intercambio de calor entre un termómetro de escala interna y el medio que lo rodea es, debido a sus características, bastante más dificultoso que en el caso de los termómetros de escala externa, por lo que es necesario, por regla general, esperar algunos minutos antes de realizar una medida.

### 5.3.2. Temperatura del baño variando en forma uniforme

Si se sumerge un termómetro de vidrio en un baño cuya temperatura varía en forma uniforme, después de transcurrido un cierto tiempo en que alcanza un estado estacionario, la velocidad de variación de la indicación del termómetro en el tiempo será sensiblemente igual a la velocidad de variación de la temperatura del baño, pero afectado por su propia inercia térmica, no indicará la temperatura instantánea de este último, sino la que el baño poseía un momento antes. Esta diferencia puede ser deducida inmediatamente a partir de la expresión (8). En efecto, después de transcurrido un tiempo suficientemente largo, será :  $\frac{d\theta}{dt} = K$  (constante). Bajo estas condiciones, la ecuación (8) podrá expresarse como

$$K = \frac{1}{\tau} \Delta\theta \quad (11)$$

en donde  $\Delta\theta = \theta_b - \theta_t$

Así por ejemplo, si el termómetro posee una constante de tiempo  $\tau = 4$  s y la velocidad de variación de la temperatura del baño con el tiempo es  $K = 0,01^\circ\text{C/s}$ , el retardo del termómetro será, de acuerdo a (11) :

$$\Delta\theta = \tau K = 4 \cdot 0,01 = 0,04^\circ\text{C}$$

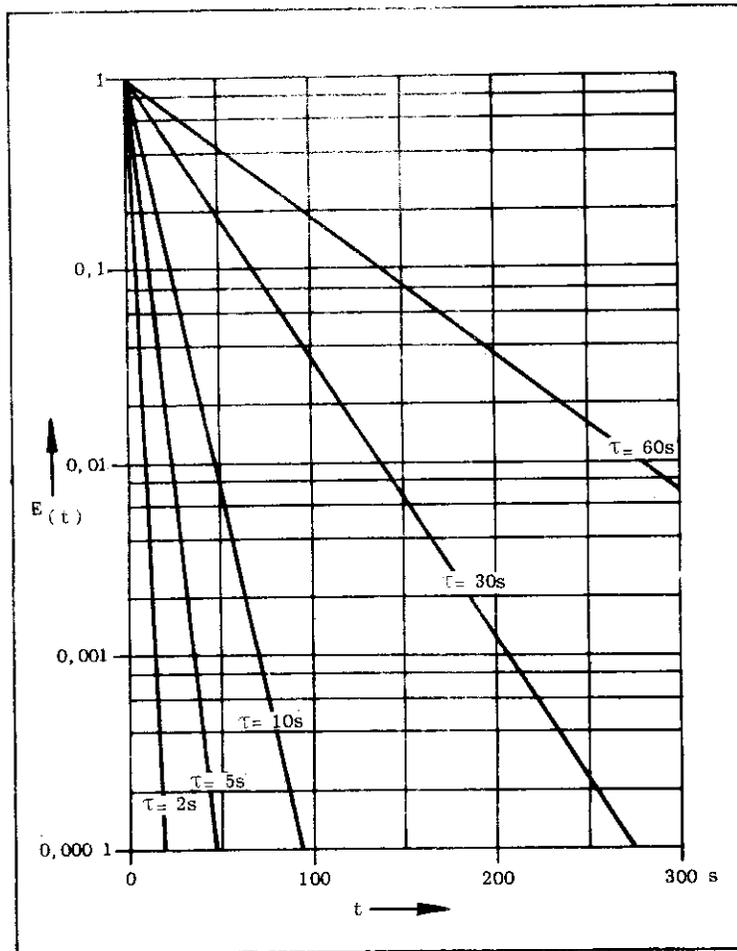


Figura 5.2'

Es decir, que el termómetro indicará una temperatura de  $0,04^\circ\text{C}$  menor que la temperatura real del baño. Este efecto se transforma en una fuente de errores cuando se comparan las indicaciones de termómetros con distintos retardos, como sucede generalmente durante la realización de una calibración. Esto se puede deducir inmediatamente a partir del siguiente ejemplo :

Supongamos que se comparan entre sí las indicaciones de dos termómetros, uno con un retardo  $\tau = 5\text{ s}$ , y el otro con un retardo  $\tau = 8\text{ s}$ . Ambos se encuentran sumergidos dentro de un baño cuya temperatura varía linealmente con el tiempo a razón de  $0,02^\circ\text{C}$  cada 5 minutos. La diferencia de temperatura que existirá entre los termómetros podrá deducirse de la expresión (11) de la siguiente forma :

La diferencia de temperatura que existe entre el primer termómetro y el baño será :

$$\theta_1 = 5 \cdot 0,004 = 0,02^\circ\text{C}$$

y entre el segundo termómetro y el baño :

$$\theta_2 = 8 \cdot 0,004 = 0,032^\circ\text{C}$$

es decir que la diferencia de temperatura entre ambos termómetros para una tem-

peratura cualquiera del baño, será :

$$\theta = 0,032 - 0,02 = 0,012^{\circ}\text{C}$$

valor que será grande o no de acuerdo a la precisión y exactitud de los termómetros.

Cualquiera sea el caso, en la práctica, en el momento de realizarse una comparación entre dos o más termómetros, es conveniente que la velocidad de variación de la temperatura del baño en donde se encuentran sumergidos sea muy pequeña, aunque -como puede observarse- no necesariamente nula. Para un tratamiento más completo de este tema, se aconseja consultar los trabajos de Harper [22] y White [23].

#### 5.4. ERROR POR COLUMNA EMERGENTE

Un termómetro de vidrio sólo indicará valores de temperaturas correctas siempre y cuando las condiciones ambientales prevalecientes durante su empleo sean similares a las que existieron en el momento de su calibración. Esto es algunas veces imposible de alcanzar por lo que conduce, a menos que se apliquen las correcciones necesarias a introducir un nuevo tipo de error en la temperatura medida. En lo que sigue, se hará una discusión detallada de estas correcciones que, por su naturaleza son denominadas correcciones por columna emergente. Estas se aplican principalmente en los siguientes casos :

- 1) Termómetros de inmersión total utilizados como termómetros de inmersión parcial.
- 2) Termómetros de inmersión parcial utilizados en inmersión incorrecta.
- 3) Termómetros de inmersión parcial utilizados correctamente inmersos, pero con una temperatura del medio que rodea a la columna emergente distinta a la prefijada por las condiciones de calibración.
- 4) Termómetros de inmersión parcial utilizados como termómetros de inmersión total.

Para realizar las correcciones por columna emergente en un termómetro de inmersión total, es necesario el conocimiento previo de la distribución de temperatura a lo largo de la misma, o también de su temperatura media. Dos métodos son empleados para ello : en uno, se utilizan termómetros de columna (ver apartado 2.2.) y en el otro, termómetros comunes o auxiliares.

En el primer caso, si el termómetro de columna es suspendido al lado de la columna emergente de un termómetro de vidrio de inmersión total, de tal forma que el extremo superior de su bulbo se encuentre al mismo nivel que el tope de la columna de líquido termométrico mientras que su extremo inferior está sumergido por lo menos 2 cm por debajo de la superficie del líquido del baño, el mismo indicará la temperatura media de la porción adyacente a la columna emergente (figura 5.3.a.). Si la longitud de esta última fuese mayor que la de los bulbos de los termómetros de columna disponibles, se podrán utilizar simultáneamente, dos o más termómetros de este tipo, pero en forma tal, que el extremo superior del bulbo del primer termómetro de columna se encuentre al mismo nivel que el tope de la columna de líquido termométrico emergente, y su extremo inferior al mismo nivel que el extremo superior del bulbo del segundo termómetro de columna y así sucesivamente (figura 5.3.b.).

Es conveniente hacer notar que la clase del termómetro de columna debe ser, en lo posible, similar a la clase del termómetro sobre el cual se desea realizar correcciones por columna emergente; ambos deberán ser termómetros de escala interna, o bien termómetros de escala externa.

Si se careciese de termómetros de columna, la temperatura media de la columna emergente podrá ser determinada utilizando termómetros comunes denominados también termómetros auxiliares. Para ello, estos últimos serán colocados en tal forma que sus bulbos deberán situarse ocupando una posición intermedia en cada porción de la columna emergente (figura 5.3.c.).

La figura 5.3.d. que representa el caso de uso simultáneo de un termómetro de columna y de un termómetro auxiliar en la determinación de la temperatura media de una columna emergente, constituye en sí, una combinación de las figuras 5.3.b. y 5.3.c.

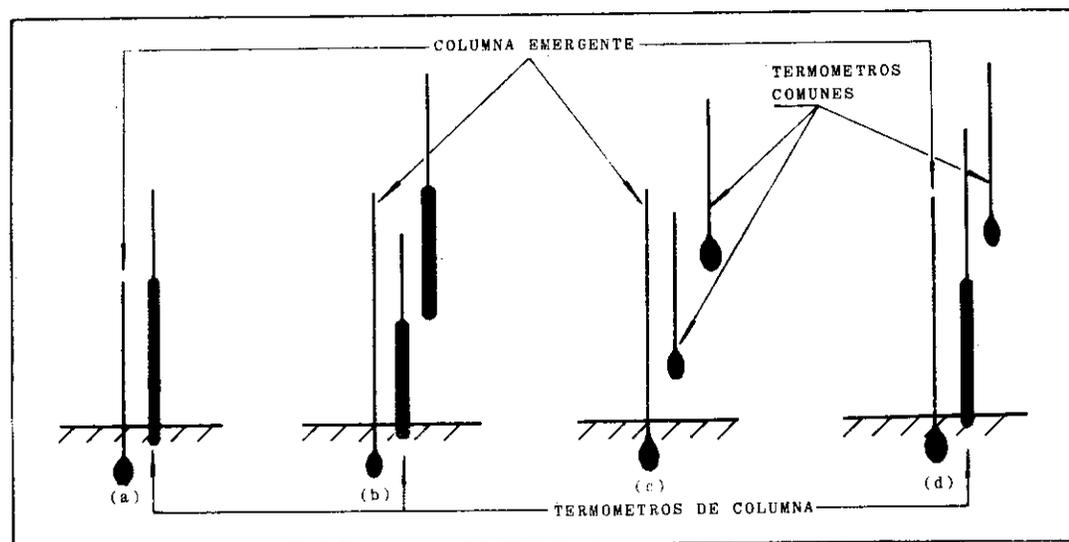


Figura 5.3

Cuando sea necesario medir la temperatura del medio que rodea a la columna emergente de un termómetro de inmersión parcial, se podrán también utilizar termómetros de columna o auxiliares, pero colocándolos en forma adyacente a aquélla, en el espacio situado entre su línea de inmersión y el tope de la columna de líquido termométrico (figura 5.5.)

Los dos métodos descritos para la determinación de la temperatura media de una columna emergente, empleando ya sea termómetros de columna o termómetros auxiliares, muestran una gran coincidencia de valores dentro del rango de temperaturas comprendidas entre  $-40^{\circ}\text{C}$  y  $100^{\circ}\text{C}$  por lo que es indiferente el uso de uno u otro método. Por encima de  $100^{\circ}\text{C}$  se aconseja, por su mayor exactitud, el uso de termómetros de columna [24] [25].

#### 5.4.1. Corrección por columna emergente en un termómetro de inmersión total

Cuando un termómetro de inmersión total es utilizado como un termómetro de inmersión parcial, se deberá aplicar sobre sus indicaciones correcciones por columna emergente. Si en la determinación de la temperatura media de esta última se emplean termómetros de columna, la corrección por columna emergente estará dada

por la siguiente expresión :

$$C_c = (N_1 - N_2) \delta (t - t_c) \quad (12)$$

en donde :

- $N_1$  es la temperatura que señala sobre la escala del termómetro el menisco de la columna de líquido termométrico.
- $N_2$  es la temperatura indicada sobre la escala del termómetro y que se encuentra al mismo nivel que el extremo inferior del bulbo del termómetro de columna.
- $\delta$  es el coeficiente de expansión cúbica del líquido termométrico, respecto al vidrio con el cual está construido el bulbo del termómetro.
- $t$  es la temperatura del bulbo del termómetro.
- $t_c$  es la temperatura que indica el termómetro de columna.

Si la temperatura  $t$  del baño, dentro del cual está sumergido el termómetro, no fuese conocida, el cálculo de  $C_c$  podrá realizarse haciendo en (12) la aproximación  $t = N_1$ . Bajo estas condiciones, se obtendrá para  $C_c$  un valor :

$$C'_c = (N_1 - N_2) \delta (N_1 - t_c) \quad (13)$$

que para muchos casos es suficiente. Una segunda aproximación de  $C_c$  a la que denominaremos  $C''_c$  y que se calculará reemplazando en (12)  $N_1$  y  $t$  por el valor  $N_1 + C'_c$  y conducirá a un resultado de mayor significación.

Muchas veces se presenta el caso en que  $N_2$  se encuentra en un lugar de la columna del termómetro, situado por debajo de su escala, lo que impide conocer directamente su valor. Para obviar esta situación, es conveniente colocar a la expresión (12) en función de la sensibilidad  $S$  del termómetro que se define como :

$$S = \frac{\Delta L}{\Delta N} \left[ \frac{\text{mm}}{^\circ\text{C}} \right] \quad (14)$$

y que expresa la diferencia expresada en mm que acusa la longitud de la columna de líquido termométrico, cuando la temperatura del bulbo varía en  $1^\circ\text{C}$ . Así por ejemplo si en un termómetro de tubo capilar uniforme y cuya escala se extiende desde  $0^\circ\text{C}$  a  $30^\circ\text{C}$  se observa que la distancia que existe entre  $25^\circ\text{C}$  y  $30^\circ\text{C}$  es de 50 mm, la sensibilidad del termómetro será :

$$S = \frac{50}{30 - 25} = 10 \text{ mm}/^\circ\text{C}$$

Si ahora designamos con  $L$  la longitud del bulbo del termómetro de columna, colocado adyacente a la columna emergente, y con  $S$  la sensibilidad del termómetro bajo observación, se tendrá de (14) que :

$$N_1 - N_2 = \frac{L}{S}$$

por lo que (12) podrá expresarse como :

$$C_c = \frac{L}{S} \delta (t - t_c) \quad (15)$$

expresión que nos da la corrección por columna emergente de un termómetro de inmersión total en función de la sensibilidad del mismo.

Si en vez de termómetros de columna se utilizan termómetros comunes para la determinación de la temperatura media de la columna emergente, la corrección a aplicar sobre la indicación del termómetro bajo observación será :

$$C_c = (N_1 - N_0) \delta (t - t'_c) \quad (16)$$

en donde  $N_1$ ,  $\delta$ , y  $t$  tienen el mismo significado que en (12) pero  $t'_c$  es la temperatura que indica el termómetro común colocado adyacente a la columna emergente, y  $N_0$  es el valor de la temperatura indicado sobre la escala del termómetro bajo observación situada a un mismo nivel que la superficie del líquido del baño, dentro del cual se encuentra inmerso parcialmente. Si la temperatura  $t$  no fuese exactamente conocida, se podrá realizar el cálculo de  $C_c$  haciendo una serie de aproximaciones de tipo iterativo, al igual que en el caso de las correcciones determinadas mediante el empleo de termómetros de columna.

Como una aplicación de las expresiones (12) y (16) se da el siguiente ejemplo. Los datos son obtenidos a partir de la figura 5.4.

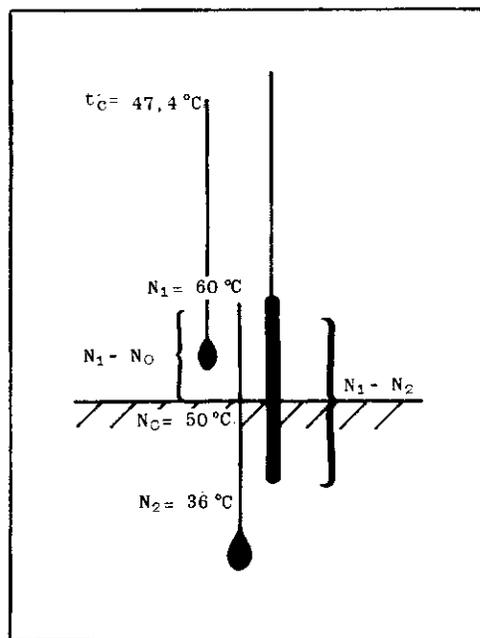


Figura 5.4

Aplicación de la expresión (12)

Datos :  $N_1 = 60^\circ\text{C}$  ;  $N_2 = 36^\circ\text{C}$  ;  $\delta = 158 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1}$  ;  $t_c = 55,2^\circ\text{C}$

Primera aproximación :  $t = N_1$

$$C'_c = (60 - 36) 158 \cdot 10^{-6} (60 - 55,2) = + 0,018 \cong + 0,02$$

Segunda aproximación :  $t = N_1 + C'_c$

$$C''_c = (60,018 - 36) 158 \cdot 10^{-6} (60,018 - 55,2) = + 0,018 \cong + 0,02^\circ\text{C}$$

Aplicación de la expresión (16)

Datos :  $N_1 = 60^\circ\text{C}$  ;  $N_0 = 50^\circ\text{C}$  ;  $\delta = 158 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1}$  ;  $t'_c = 47,4^\circ\text{C}$

Primera aproximación :  $t = N_1$

$$C'_c = (60 - 50) 158 \cdot 10^{-6} (60 - 47,4) = + 0,019 \cong 0,02^\circ\text{C}$$

Segunda aproximación :  $t = N_1 + C'_c$

$$C''_c = (60,019 - 50) 158 \cdot 10^{-6} (60,019 - 47,4) = + 0,019 \cong + 0,02^\circ\text{C}$$

Se puede observar :

- 1) Que la corrección  $C'_c$  es suficiente en ambos casos, ya que  $C''_c$  no difiere significativamente de aquélla
- 2) Que cuando la temperatura del baño es mayor que la temperatura de la columna emergente del termómetro, el signo de  $C_c$  es positivo.

La temperatura verdadera que indicará el termómetro (ver capítulo 5) será entonces, si no se tienen en cuenta otras fuentes de errores :

$$t_v = 60 + 0,02 = 60,02^\circ\text{C}$$

#### 5.4.2. Coeficiente relativo de expansión cúbica

El coeficiente  $\delta$  para un determinado líquido termométrico depende de la clase de vidrio con el cual fue construido el termómetro y aún para la misma clase de vidrio, depende también del intervalo de temperatura  $t - t_c$ . Cuando las mediciones no requieren gran exactitud, el coeficiente de expansión cúbica relativo a adoptarse, cualquiera sea el rango de temperatura, será :

	$\delta$
Hg y Hg - Talio	$0,00016^\circ\text{C}^{-1}$
Galio (*)	$0,00010^\circ\text{C}^{-1}$
Pentano, Alcohol, Tolueno	$0,0010^\circ\text{C}^{-1}$

En mediciones de precisión, en cambio, los valores de  $\delta$  podrán ser deducidos de la tabla 5.2. en la que, para facilitar los cálculos, se presentan directamente en función de la temperatura promedio  $T = \frac{t + t_c}{2}$  correspondiente al intervalo de temperatura  $t - t_c$ .

---

(\*) El galio es un metal de color verde negruzco, cuyos puntos de fusión y de ebullición son  $29,78^\circ\text{C}$  y  $1983^\circ\text{C}$  respectivamente. Estos valores hacen posible su utilización como líquido termométrico en termómetros de vidrio para altas temperaturas.

Tabla 5. 2.

Coefficientes de expansión cúbica relativos  $\beta$  para distintos líquidos termométricos

a) Líquidos no humectantes

Temperatura °C	Hg y Hg - Talio en vidrio :			
	Normal 16''' grad <sup>-1</sup>	Nº 2 954 grad <sup>-1</sup>	Supremax grad <sup>-1</sup>	Cuarzo grad <sup>-1</sup>
0	0,000 158	0,000 164	0,000 172	0,000 181
50	0,000 158	0,000 164	0,000 172	0,000 181
100	0,000 159	0,000 165	0,000 173	0,000 182
150	0,000 160	0,000 166	0,000 174	0,000 184
200	0,000 161	0,000 168	0,000 176	0,000 186
250	0,000 163	0,000 170	0,000 179	0,000 189
300	0,000 166	0,000 173	0,000 182	0,000 193
350	0,000 170	0,000 177	0,000 186	0,000 197
400	0,000 175	0,000 182	0,000 191	0,000 203
450	-	0,000 189	0,000 197	0,000 209
500	-	-	0,000 204	0,000 216
600	-	-	0,000 222	0,000 234
700	-	-	-	0,000 254

b) Líquidos humectantes

Temperatura °C		
	Pentano grad <sup>-1</sup>	Alcohol Toluol Xilol grad <sup>-1</sup>
-200	0,000 9	-
-150	0,000 9	-
-100	0,001 0	0,001
- 50	0,001 3	0,001
0	0,001 5	0,001
50	-	0,001
100	-	0,001

5.4.3. Corrección por columna emergente en un termómetro de inmersión parcial

Los valores de la tabla de calibración (ver apartado 6.4.) de un termómetro de inmersión parcial, son referidos para una determinada profundidad de inmersión del mismo y para la temperatura del medio que rodea a la columna emergente en el momento de su calibración y que se encuentra situada por encima del baño de comparación.

En este caso, si el termómetro es utilizado correctamente inmerso, en la práctica no es necesario aplicar sobre sus indicaciones ninguna corrección por columna emergente debido principalmente a la imposibilidad de reproducir exactamente, durante su uso, las condiciones ambientales que prevalecieron en la calibración. Por este motivo, estos termómetros sólo son utilizados en medidas de temperaturas que no requieren gran exactitud. Cuando ésta sea necesaria, los valores de la tabla de calibración del termómetro serán referidos no sólo para una determinada

profundidad de inmersión del mismo, sino también para una temperatura fija (usualmente 20°C) del medio que rodea a la columna emergente. Si durante el uso del termómetro, esta última condición no se cumple, entonces se aplicará a su indicación la siguiente corrección por columna emergente :

$$C_c = \frac{L}{S} \delta (t_m - t_c) \quad (17)$$

en donde L es la longitud de la columna de líquido termométrico emergente. S,  $t_c$  y  $\delta$  tienen el mismo significado que en (15) y  $t_m$  es la temperatura que deberá poseer el medio que rodea a la columna emergente del termómetro de inmersión parcial, para que los valores de la tabla de calibración sean válidos. El valor de  $\delta$  podrá deducirse para una temperatura  $T = \frac{t_m + t_c}{2}$  de la tabla 5.2.

La temperatura media de la columna emergente podrá ser determinada utilizando termómetros de columna (figura 5.5. a.) o termómetros comunes (figura 5.5. b.)

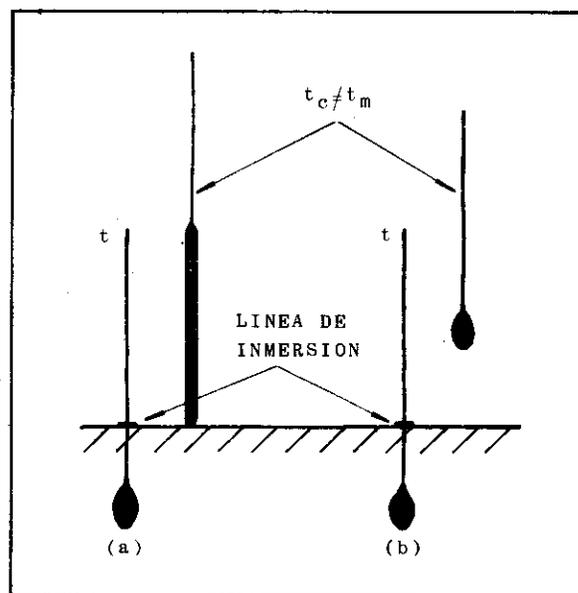


Figura 5.5

Si la columna emergente del termómetro fuese demasiado larga, se podrán utilizar simultáneamente varios termómetros de columna o termómetros comunes, o bien ambos tipos de termómetros a la vez, tal como puede observarse en la figura 5.6. La corrección por columna emergente que se aplicará en este caso sobre la indicación del termómetro será :

$$C_c = \frac{L}{S} \delta (t_m - T) \quad (18)$$

en donde  $L = L_1 + L_2 + L_3$  y T es la temperatura media del medio que rodea a la columna emergente.

Si se tiene en cuenta que la distribución de temperatura a lo largo de esta última no es lineal, sino que obedece a una curva de distribución similar a cualquiera de las que pueden observarse en la figura 5.7., la temperatura media de la columna emergente será el promedio :

$$T = \frac{L_1 t_1 + L_2 t_2 + L_3 t_3}{L_1 + L_2 + L_3} \quad (19)$$

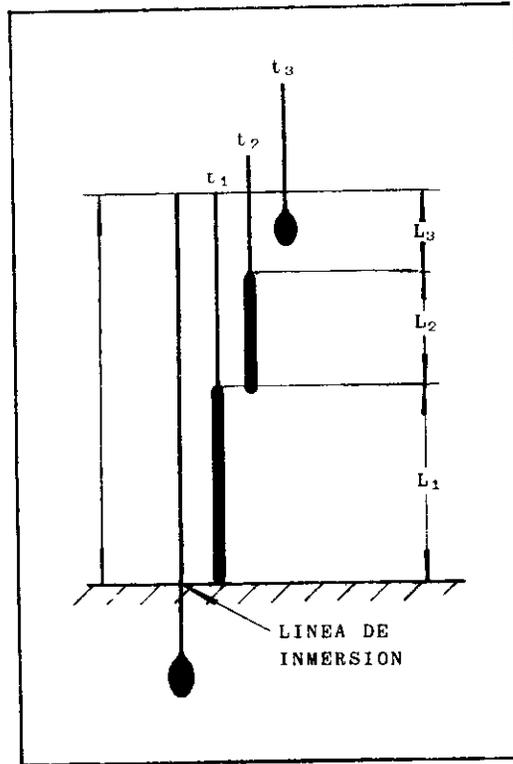


Figura 5.6

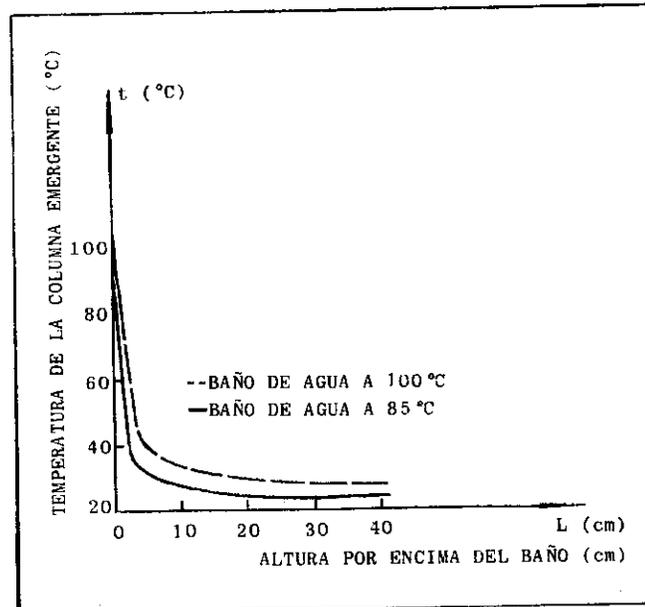


Figura 5.7

Curvas típicas de distribución de temperatura por encima de un baño de agua a 85 °C y 100 °C.

#### 5.4.4. Casos particulares

5.4.4.1. Si el tubo capilar del termómetro de inmersión parcial no fuese uniforme (figura 5.8.) y si la temperatura del medio que rodea a la columna emergente es distinta de  $t_m$ , se aplicará a sus indicaciones, la siguiente corrección por columna emergente:

$$C_c = \frac{L_1}{S_1} \delta_1 (t_m - t_{c1}) + \frac{L_2}{S_2} \delta_2 (t_m - t_{c2}) \quad (20)$$

en donde :

- $L_1$  : es la longitud de la columna de líquido termométrico comprendida entre su extremo superior y la unión de los dos capilares  $A_i$ .
- $L_2$  : es la longitud de la columna de líquido termométrico comprendida entre  $A_i$  y la línea de inmersión.
- $S_1$  : es la sensibilidad del termómetro a lo largo de  $L_1$ .
- $S_2$  : es la sensibilidad del termómetro a lo largo de  $L_2$ .
- $t_{c1}$  : es la temperatura media de  $L_1$ .
- $t_{c2}$  : es la temperatura media de  $L_2$ .
- $\delta_1$  y  $\delta_2$  : son los coeficientes de expansión cúbica relativos del líquido termométrico a las temperaturas  $T_1 = \frac{t_m + t_{c1}}{2}$  y  $T_2 = \frac{t_m + t_{c2}}{2}$  respectivamente.

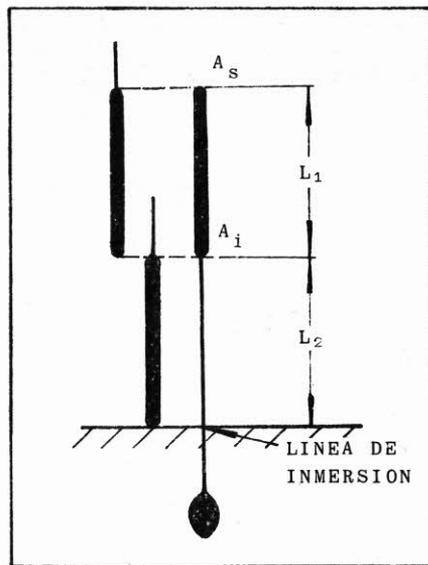


Figura 5.8

Como una aplicación de la expresión (20), consideremos en lo que sigue, el siguiente ejemplo hipotético. Se tiene un termómetro de inmersión parcial de tubo capilar no uniforme construido de vidrio normal 16'':

Datos :

$$\begin{array}{llll} L_1 = 100 \text{ mm} & S_1 = 0,58 \text{ mm/grad}^{-1} & \delta_1 = 0,000 158 \text{ grad}^{-1} & t_{c1} = 30^\circ\text{C} \\ L_2 = 180 \text{ mm} & S_2 = 4,00 \text{ mm/grad}^{-1} & \delta_2 = 0,000 158 \text{ grad}^{-1} & t_{c2} = 50^\circ\text{C} \end{array}$$

Reemplazando estos valores en la expresión (20) se tendrá .

$$C_c = 100 \cdot 0,000\,158 (20 - 30) + 180 \cdot 0,000\,158 (20 - 50)$$

$$C_c = - 1,01 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para determinar la sensibilidad de un termómetro de tubo capilar no uniforme en una zona de la columna en donde no se encuentra grabada la escala, como podría ser el caso de  $S_2$  de la figura 5.8, se procederá del siguiente modo: se practicarán, en primer término, dos pequeñas marcas  $I_1$  e  $I_2$  sobre el tubo capilar separadas por una distancia  $L$ , de tal modo que las mismas puedan ser eliminadas posteriormente con facilidad sin dañar en absoluto al termómetro. Luego se procederá a enfriar lentamente el termómetro sumergiéndolo para ello en un baño adecuado, con juntamente con un termómetro auxiliar que permitirá determinar las temperaturas correspondientes a  $I_1$  e  $I_2$  al observar sus indicaciones cuando el nivel del menisco de la columna de líquido termométrico del termómetro considerado, coincida con cada una de las respectivas marcas. Puesto que la distancia entre estas últimas puede ser conocida (midiendo por ejemplo con una regla milimetrada), la determinación de las temperaturas  $t_1$  y  $t_2$  permitirá deducir de inmediato la sensibilidad  $S_2$  a partir de la expresión :

$$S_2 = \frac{L I_1 I_2}{t_1 - t_2}$$

5.4.4.2. En algunos casos, un termómetro de inmersión parcial suele ser utilizado como un termómetro de inmersión total. Cuando esto se verifica la corrección por columna emergente que se aplicará a sus indicaciones, estará dada por la expresión :

$$C_c = \frac{L}{S} \delta (t_m - t) \quad (21)$$

en donde  $L$  es la longitud de la columna de líquido termométrico referido a la línea de inmersión,  $t$  es la temperatura del bulbo y  $\delta$  es el coeficiente de expansión cúbico relativo del líquido termométrico para la temperatura  $T = \frac{t_m + t}{2}$ .  $S$  y  $t_m$  tienen el mismo significado que en (17).

5.4.4.3. Cuando un termómetro de inmersión parcial de tubo capilar uniforme; cuya columna emergente se encuentra a una temperatura distinta a  $t_m$  y además está inmerso incorrectamente tal como sucede en el caso de que su línea de inmersión se encuentre situada a una cierta distancia por debajo de la superficie del líquido, se aplicará sobre sus indicaciones la siguiente corrección :

$$C_c = \frac{L_1}{S} \delta_1 (t_m - t_c) + \frac{L_2}{S} \delta_2 (t_m - t) \quad (22)$$

que no resulta ser más que una combinación de las expresiones (17) y (21) y en donde :

- $L_1$  : es la longitud de la columna de líquido termométrico que existe entre el menisco y el nivel correspondiente a la superficie del líquido.
- $L_2$  : es la longitud de la columna de líquido termométrico que existe entre el nivel correspondiente a la superficie del líquido y la línea de inmersión del termómetro.
- $S$  : es la sensibilidad del termómetro.

$\delta_1$  y  $\delta_2$  : son los coeficientes de expansión cúbicos relativo del líquido termométrico para las temperaturas  $T_1 = \frac{t_m + t_c}{2}$  y  $T_2 = \frac{t_m + t}{2}$  respectivamente.

$t_m$ ,  $t_c$  y  $t$  tienen los mismos significados que en (17) y (21).

Si el termómetro, en cambio, fuese inmerso de tal modo que la línea de inmersión quede por arriba del nivel de la superficie del líquido, una longitud  $L_2$ , la corrección que se aplicará sobre las indicaciones del termómetro será :

$$C_c = \frac{L_1}{S} \delta_1 (t_m - t_{c1}) + \frac{L_2}{S} \delta_2 (t - t_{c2})$$

## 6. Calibración de un termómetro de vidrio

### 6.1. CORRECCION DE LA ESCALA, CORRECCION REDUCIDA Y CORRECCION DEL 0°C

Se define la corrección de la escala  $C_e$  como la diferencia que existe entre la indicación de un termómetro de vidrio, utilizado en posición vertical, bajo la presión de una atmósfera y la temperatura del medio dentro del cual está sumergido. Su valor dependerá esencialmente de la historia térmica del tipo de vidrio con el cual se ha construido el termómetro manifestada por el aumento secular y la depresión temporal del cero, efectos que ya fueron mencionados en el apartado 5.1. En general, el valor de  $C_e$  resultará ser diferente para cada división de la escala del termómetro y, debido a ello, durante el proceso de calibración será necesario determinar los valores de  $C_e$  en varios puntos uniformemente distribuidos a lo largo de la misma, pudiéndose obtener los valores de  $C_e$  correspondientes a las restantes divisiones, mediante la realización de una adecuada interpolación.

En el apartado 5.1. se ha observado, también, que el volumen de líquido termométrico que puede ser contenido por el tubo capilar, es despreciable frente al volumen contenido por el bulbo, lo que traerá como consecuencia que las variaciones que se originen en este último produzcan variaciones de igual magnitud y signo en cada punto de la escala. Si esta última contiene la división correspondiente al 0°C, las mencionadas variaciones podrán ser determinadas con relativa facilidad y por ello, en medidas de precisión, se conviene en definir a la corrección de la escala  $C_e$  por la expresión [26]:

$$C_e = C_r + C_0 \quad (24)$$

en donde :

$C_0$  : es la corrección del 0°C o corrección del cero, que depende principalmente de la historia térmica del vidrio. Su valor se podrá determinar introduciendo el termómetro en el punto fijo del hielo (ver apartado 12.1.).

$C_r$  : es la corrección reducida cuyo valor, prácticamente independiente de la historia térmica del vidrio, depende de la uniformidad de la luz del tubo capilar, por lo que puede considerarse como constante, aunque difiere en general para cada punto de la escala del termómetro. Se verifica, además, que  $C_r = 0$  para la división de la escala correspondiente al  $0^\circ\text{C}$ .

Es interesante observar, por otro lado, que si en la expresión (24) es  $C_o = 0$ , la corrección de la escala será igual a la corrección reducida. Esta última sólo puede ser indirectamente determinada para cada división de la escala, a través de la relación :

$$C_r = C_e - C_o \quad (25)$$

que se obtendrá determinando en primer término el valor de  $C_e$  e inmediatamente después  $C_o$ , aplicando luego la expresión (25).

## 6.2. PRUEBA DE ESTABILIDAD

En el capítulo 4 hemos mencionado y analizado algunos de los defectos y fallas que suelen afectar el funcionamiento correcto de un termómetro. Si el estado de este último, después de haber sido sometido a una inspección ocular, resulta ser aceptable, convendrá realizar sobre él una prueba de estabilidad (léase, estabilidad del  $0^\circ\text{C}$  del termómetro). La misma permitirá deducir la constancia o no en el tiempo de los valores de  $C_e$  que se aplicarán sobre las indicaciones del termómetro y que serán determinadas posteriormente durante su calibración.

La prueba de estabilidad a la que se deberá someter un termómetro de vidrio, dependerá del rango de temperaturas que abarque su escala. Así se tendrá :

- 1) Para termómetros cuyo rango de utilización no excede de  $110^\circ\text{C}$  :
  - a) Se dejará el termómetro en "reposo" durante un tiempo mínimo de tres días a una temperatura ambiente comprendida entre  $20^\circ\text{C}$  y  $25^\circ\text{C}$ . Luego se procederá a medir la temperatura de  $0^\circ\text{C}$  introduciéndolo para ello en el punto fijo del hielo.
  - b) Se someterá al termómetro a una temperatura aproximadamente igual al máximo valor de la temperatura sobre su escala durante un tiempo mínimo de 5 minutos en un baño adecuado.
  - c) Se retirará el termómetro del baño y se lo dejará enfriar en contacto directo con el aire, permitiendo luego que el mismo permanezca en "reposo" durante un tiempo mínimo de tres días a una temperatura ambiente comprendida entre  $20^\circ\text{C}$  y  $25^\circ\text{C}$ , antes de proceder a realizar una nueva observación a la temperatura de  $0^\circ\text{C}$ .
- 2) Para termómetros cuyo rango de utilización excede de  $110^\circ\text{C}$ :
  - a) Se someterá al termómetro a una temperatura igual al máximo valor de temperatura sobre su escala durante un tiempo mínimo de 5 minutos, introduciéndolo para ello en un baño adecuado.
  - b) Se retirará el termómetro del baño de temperatura lentamente para evitar un shock térmico y luego se lo dejará enfriar en contacto directo con el aire.
  - c) Cuando el termómetro alcance una temperatura aproximadamente igual a  $50^\circ\text{C}$  se lo introducirá en el punto fijo del hielo y después de 15 minutos

se procederá a leer el valor correspondiente.

- d) Se dejará el termómetro en "reposo" durante 24 horas a una temperatura ambiente comprendida entre 20°C y 25°C.
- e) Se repetirá a), b) y c).

En los dos casos, si la variación que se observa en la indicación del 0°C de los termómetros es mucho mayor que la tolerancia esperada (ver apartado 6.5.1.), los termómetros no son de buena calidad y su calibración no es justificable.

Si la escala del termómetro careciese de la graduación correspondiente al 0°C, el problema es algo más complejo. En este caso se tomará como temperatura de referencia el valor más próximo al 0°C y se procederá del mismo modo que para el caso anterior. La temperatura de referencia podrá ser constatada con un termómetro auxiliar.

### 6.3. ELECCION DE LOS PUNTOS DE CALIBRACION SOBRE LA ESCALA DEL TERMOMETRO

Los puntos que se seleccionarán sobre la escala del termómetro con el fin de determinar sobre ellos las correcciones de la escala  $C_e$ , deberán estar distribuidos uniformemente a lo largo de la misma y su número dependerá esencialmente de la exactitud con que se desea obtener las correspondientes correcciones  $C_e$  sobre las restantes divisiones, mediante la realización de una interpolación. Así por ejemplo, si los puntos seleccionados están separados entre sí por 100 divisiones, una interpolación a través de ellos conducirá a un error en los puntos intermedios de aproximadamente media división. Si, en cambio, los puntos seleccionados estuviesen separados por una distancia comprendida entre 20 a 50 divisiones, la interpolación originará en los puntos intermedios un error de 1 a 2 décimas de división. En cualquier caso, un termómetro deberá ser examinado al menos en tres puntos, distribuidos uniformemente, incluyendo la graduación correspondiente al 0°C, si la escala lo contiene. Así por ejemplo, para un termómetro cuya escala se extiende desde 0°C a 100°C, las temperaturas de calibración podrán ser : 0°C, 50°C y 100°C.

### 6.4. CALIBRACION DE UN TERMOMETRO DE VIDRIO : DETERMINACION DE $C_e$

La calibración de un termómetro de vidrio consiste en comparar sus indicaciones con temperaturas conocidas de alguna escala de referencia. Más exactamente, significa determinar las correcciones  $C_e$  correspondientes a cada uno de los puntos de interés de la escala del termómetro.

Para preservar la validez de los valores de  $C_e$ , será necesario realizar una verdadera evaluación del cero del termómetro, pero teniendo en cuenta que el efecto de la depresión temporal podría estar afectando simultáneamente a la indicación del mismo. Esta situación puede ser obviada, si es posible idear algún procedimiento que permita que el valor de la depresión temporal permanezca siempre como un factor constante y su efecto ser cancelado cuando se comparen, por ejemplo, grupos de datos obtenidos en diferentes mediciones realizadas con un mismo termómetro. Por esta causa es costumbre, en la práctica, acondicionar los termómetros antes de calibrarlos, de acuerdo a las siguientes prescripciones :

- a) Los termómetros cuyas escalas no exceden de 110°C deben, antes de su calibración, permanecer sin uso durante un tiempo mínimo de tres días a temperatura ambiente.
- b) Los termómetros cuyas escalas exceden de 110°C deben ser expuestos antes de su calibración, durante 5 minutos como mínimo, a una temperatura aproximada

mente igual al máximo valor de la temperatura indicada sobre su escala, y luego dejados enfriar a temperatura ambiente en contacto directo con el aire.

La primera observación en los termómetros a calibrar, será la correspondiente a la temperatura de 0°C. Para ello, los mismos serán introducidos en un punto fijo de hielo y después de 15 minutos, sus indicaciones leídas y registradas en una planilla adecuada. Los termómetros serán luego sumergidos conjuntamente con dos termómetros patrones en un baño de comparación (ver apartado 12.3.) al que se le suministrará la potencia eléctrica necesaria para que su temperatura, en el momento de la observación, permanezca constante o varíe linealmente con el tiempo, con un régimen de velocidad que dependerá del rango de temperatura que cubran las escalas de los termómetros, tal como puede apreciarse en la tabla 6.1. :

Tabla 6.1.

Rango de temperatura °C	Velocidad máxima de variación de la temperatura del baño (°C/minuto)
-200 a - 58	0,1
- 58 a - 5	0,05
- 5 a 110	0,02
110 a 310	0,03
310 < t	0,05

Es conveniente, además, que durante la calibración de un termómetro de vidrio de Hg, la temperatura del baño varíe en forma ascendente, especialmente si el diámetro de la luz del tubo capilar es muy pequeño (termómetros graduados en intervalos de temperatura de 0,01°C a 0,2°C) ya que bajo estas condiciones la forma del menisco de la columna de Hg se mantendrá prácticamente constante, evitándose con ello cambios en el volumen del bulbo que podrían ocurrir debido a variaciones en las fuerzas capilares (ver capítulo 10).

Dos observadores, A y B, serán afectados a la realización de la calibración. Así, mientras A leerá las indicaciones de los termómetros, B registrará los mencionados valores en la planilla y viceversa. El observador A comenzará leyendo de izquierda a derecha y luego de derecha a izquierda. Inmediatamente después lo hará B, procediendo a leer primero de derecha a izquierda y luego de izquierda a derecha. Así por ejemplo, si suponemos que se calibran dos termómetros E<sub>1</sub> y E<sub>2</sub> y designamos con P<sub>1</sub> y P<sub>2</sub> a los termómetros patrones, la figura 6.1. muestra gráficamente la forma en que los operadores A y B procederán.

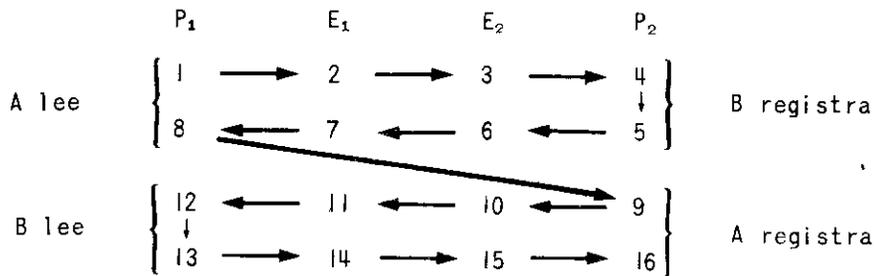


Figura 6.1

Se deduce que cada termómetro será leído cuatro veces. Las lecturas se realizarán en forma regular, de modo que si la temperatura del baño aumenta linealmente con el tiempo, su temperatura media, en el lapso que dure la medición, será sensiblemente igual a la temperatura media de los termómetros. De esta forma,

se podrá eliminar la influencia que pueda tener el baño de comparación sobre las indicaciones de los termómetros. Un modo de comprobar esto último es verificar que las diferencias existentes entre la primera y cuarta lectura de cada uno de los termómetros sean aproximadamente iguales.

Inmediatamente después de efectuada la comparación de las indicaciones de los termómetros, los termómetros patrones serán retirados del baño de comparación e introducidos dentro del punto fijo de hielo con el fin de determinar sus respectivos  $C_0$ . Estos valores, conjuntamente con los valores de  $C_r$ , que se suministran en las tablas de calibración de ambos termómetros, permitirán calcular la temperatura verdadera señalada por cada uno de ellos. Su promedio dará la temperatura media prevaleciente en el baño en el momento de efectuarse la comparación. Esta temperatura media se comparará, entonces, con el valor promedio de las indicaciones de cada uno de los termómetros que se desea calibrar, para obtener con ello, la corrección de la escala correspondiente a la temperatura particular de la observación. De igual forma se procederá con los restantes puntos de interés de la escala de los termómetros  $E_1$  y  $E_2$  hasta que todas las correcciones  $C_e$  sean determinadas.

En el capítulo 5 hemos visto el significado de la expresión :

$$t_v = t_i + C$$

de donde :

$$C = t_v - t_i \quad (26)$$

Si denominamos con  $t_{p1}$  y  $t_{p2}$  las temperaturas verdaderas indicadas por los termómetros patrones  $P_1$  y  $P_2$  respectivamente, la expresión (26) podrá ser puesta, por las consideraciones anteriores, en la forma :

$$C = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{2} - t_i \quad (27)$$

representando con  $C$  a la suma de las correcciones  $C_0$ ,  $C_r$  y eventualmente  $C_c$  si cabría la necesidad de aplicar sobre la indicación del termómetro bajo observación una corrección por columna emergente (se suponen despreciables todas las demás fuentes de errores). El valor de  $C_e$  podrá ser obtenido de inmediato, sabiendo que  $C = C_e + C_c$ , por lo que :

$$C_e = C - C_c = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{2} - t_i - C_c \quad (28)$$

En el caso general de que las indicaciones del termómetro estuviesen afectadas simultáneamente por otras fuentes de errores, el valor de  $C_e$  estará dado por la expresión :

$$C_e = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{2} - t_i - \sum_i C_i \quad (29)$$

El siguiente ejemplo es una aplicación de la expresión (29) en la determinación de  $C_e$ , en dos termómetros  $E_1$  y  $E_2$  cuyas escalas están graduadas en intervalos de temperatura de  $0,01^\circ\text{C}$  (se supone  $\sum_i C_i = 0$ ) :

<u>Comparación de las indicaciones :</u>	P <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	P <sub>2</sub>
Observador A leyendo :				
de izquierda a derecha	25,026	24,996	24,995	25,018
de derecha a izquierda	25,028	24,998	24,997	25,018
Observador B leyendo :				
de derecha a izquierda	25,032	25,000	24,999	25,021
de izquierda a derecha	<u>25,032</u>	<u>25,000</u>	<u>25,000</u>	<u>25,024</u>
Promedio de las indicaciones :	25,030	24,999	24,998	25,020

Lectura en el punto de hielo de los termómetros patrones después de la comparación

Observador A	+0,014		+0,019
Observador B	+0,014		+0,019
Promedio	+0,014		+0,019
C <sub>0</sub>	-0,014		-0,019

Cálculo de la corrección C<sub>e</sub> de E<sub>1</sub> y E<sub>2</sub> :

Promedio de las indicaciones	25,030	24,999	24,998	25,020
Corrección reducida (de tablas de calibración)	C <sub>F</sub> -0,020			-0,009
Corrección del cero	C <sub>0</sub> -0,014			-0,019
Corrección por columna emergente	C <sub>c</sub> -			-
temperatura verdadera	t <sub>p</sub> 24,996			24,992
temperatura verdadera promedio				
$t_v = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{2}$	24,994			
Corrección de la escala	C <sub>e</sub>	-0,005	-0,004	

Muchas veces, los valores obtenidos de las lecturas de los termómetros durante una comparación no son convincentes u ofrecen dudas. Cuando ello sucede, se aconseja la repetición de la medición. Un caso común se presenta cuando el valor promedio

$t_v = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{2}$  está fuera de los límites de exactitud de los termómetros patrones.

La repetición de la medida será entonces conveniente. Si en esta segunda medición el valor de  $t_v$  cumple con esta última condición, se aceptarán los nuevos valores. Si ello no sucede, convendrá revisar los termómetros. Burbujas de gas en el seno del líquido termométrico o bien humedad en las paredes del tubo capilar, entre otros, podrían estar afectando las indicaciones de uno o ambos termómetros patrones. En este caso se tratará de eliminar dichos defectos, y si ello no fuera posible, se procederá a cambiar el o los termómetros patrones.

## 6.5. TOLERANCIA Y EXACTITUD

### 6.5.1. Tolerancia

Es imposible la fabricación de un termómetro de vidrio perfecto, es decir, libre de cualquier tipo de defectos, debido a que pequeños errores en la señalización y también en la graduación de la escala, son inevitables, así como cambios en sus indicaciones con el tiempo. No obstante, ciertos límites de tolerancia han sido adoptados en la práctica y a los mismos deberán ajustarse las indicaciones de los termómetros -

tros para ser considerados aceptables. Para ello se define a la tolerancia de un termómetro como el máximo valor que podrá desviarse la indicación del mismo con respecto a la temperatura verdadera. Estos valores son asumidos como parte de un compromiso que permite, por un lado asegurar un resultado satisfactorio en las indicaciones de un termómetro, y por otro evitar al fabricante engorrosas dificultades en su elaboración, aunque sin perder de vista las exigencias de un continuo perfeccionamiento en las técnicas empleadas para su fabricación.

Los valores de tolerancia aceptados en la práctica se muestran en la tabla 6.2.

Tabla 6.2.

1) Tolerancias para termómetros llenados con líquidos humectantes.

Rango de temperatura (°C)	Escala graduada en intervalos de temperatura de: (°C)					
	0,2	0,5	1	2	5	10
-200 a - 58			3	4	5	10
- 58 a - 5	1	1	2	4	5	10
- 5 a +110	1	1	2	3	5	10
+110 a +210		3	3	4	5	10

2) Tolerancias para termómetros llenados con líquidos no humectantes

Rango de temperatura (°C)	Escala graduada en intervalos de temperatura de : (°C)								
	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5 a 10
- 58 a - 5	-	0,10	0,2	0,3	0,4	0,5	1	2	3
- 5 a + 60	0,02	0,04	0,1	0,15	0,2	0,5	0,7	1	2,5
+ 60 a +110	-	0,04	0,15	0,25	0,3	0,5	1	1,5	3
+110 a +210	-	0,10	0,2	0,3	0,5	1	1,5	2	4
+210 a +310	-	-	-	0,5	0,5	1,5	2	3	5
+310 a +410	-	-	-	1,0	1,0	2	2,5	4	7
+410 a +625	-	-	-	-	-	-	3	6	10
+625 a + t	-	-	-	-	-	-	-	6	10

#### 6.5.2. Exactitud

En el apartado 2.4. se definió la exactitud de la medida de un termómetro, como el valor más cercano al verdadero valor de la temperatura, cuando todas las correcciones han sido aplicadas y los errores accidentales como los no medibles estimados.

La tabla 6.3. muestra la exactitud que es posible esperar de las medidas realizadas con un buen termómetro de inmersión total, calibrado frente a termómetros de vidrio patrones. La misma dependerá del rango de temperatura y de la división de la escala. Sus valores han sido deducidos en base a la experiencia lograda en el estudio de numerosos termómetros durante varios años, y corresponden a una probabilidad estadística del 95 % [27].

Tabla 6. 3.

1) Exactitud de termómetros de inmersión total llenados con líquidos humectantes.

Rango de temperatura (°C)	Escala graduada en intervalos de temperatura de : (°C)					
	0, 2	0, 5	1	2	5	10
-200 a - 58	-	1	1	1	2	3
- 58 a - 5	0, 2	0, 2	0, 5	1	2	3
- 5 a +110	0, 2	0, 2	0, 3	0, 5	2	3
+110 a +210	-	0, 5	0, 5	1	2	3

2) Exactitud de termómetros de inmersión total llenados con líquidos no humectantes.

Rango de temperatura (°C)	Escala graduada en intervalos de temperatura de : (°C)									
	0, 01	0, 02	0, 05	0, 1	0, 2	0, 5	1	2	5	10
- 58 a - 5	-	0, 02	0, 03	0, 05	0, 1	0, 2	0, 3	0, 5	1	3
- 5 a +110	0, 01	0, 01	0, 02	0, 02	0, 05	0, 1	0, 2	0, 5	1	3
+110 a +210	-	0, 02	0, 05	0, 05	0, 1	0, 2	0, 2	0, 5	1	3
+210 a +310	-	-	-	0, 2	0, 2	0, 2	0, 3	1	2	3
+310 a +410	-	-	-	0, 3	0, 4	0, 5	0, 5	1	2	3
+410 a +510	-	-	-	-	-	0, 5	0, 5	1	2	3
+510 a +630	-	-	-	-	-	1	1	1	2	3

Si la calibración de los termómetros de vidrio se llevara a cabo comparando sus indicaciones con las indicaciones de una resistencia de platino (ver capítulo 9), los valores de la tabla 6. 3. se reducirán aproximadamente a la mitad. Para termómetros de inmersión parcial, los valores de exactitud esperados serán aproximadamente dos veces los valores de la tabla 6. 3. Para mayores datos, el lector interesado puede consultar también [10] y [28].

#### 6.6. CALIBRACION DE UN TERMOMETRO DE INMERSION PARCIAL

Como se definió en 2. 2., estos termómetros son diseñados para indicar temperaturas correctas, cuando el bulbo y una parte especificada de la columna se encuentran expuestos a la temperatura que se quiere determinar. El resto de la columna se encuentra a temperatura ambiente.

Cuando se requiera alguna exactitud, en las tablas de calibración de estos termómetros, los valores de las correcciones  $C_e$  serán referidos a una temperatura ambiente prefijada (usualmente 20°C), por lo que si durante el uso de los mismos la temperatura ambiente prevaleciente sobre la columna emergente es distinta a la temperatura ambiente prefijada por las condiciones de calibración, será necesario aplicar sobre sus indicaciones las correcciones por columna emergente (ver apartado 5.4.3.).

Tres métodos son empleados en la calibración de un termómetro de inmersión parcial y, en todos ellos, las indicaciones de estos últimos se compararán con las indicaciones de dos termómetros patrones en un procedimiento similar a lo ya bosquejado en el apartado 6.4.

Método 1 : Los termómetros son calibrados totalmente sumergidos como si se trataran de termómetros de inmersión total, realizándose después las correcciones necesarias sobre sus indicaciones para la prescripta inmersión y temperatura de la columna emergente (expresión 21 del apartado 5.4.4.2.). Este método presenta la desventaja de que a temperaturas elevadas se podría producir un calentamiento excesivo de la cámara de expansión del termómetro y, como consecuencia de ello, una sobrepresión del gas inerte situado dentro del mismo, que podrá conducir eventualmente a un error en sus indicaciones.

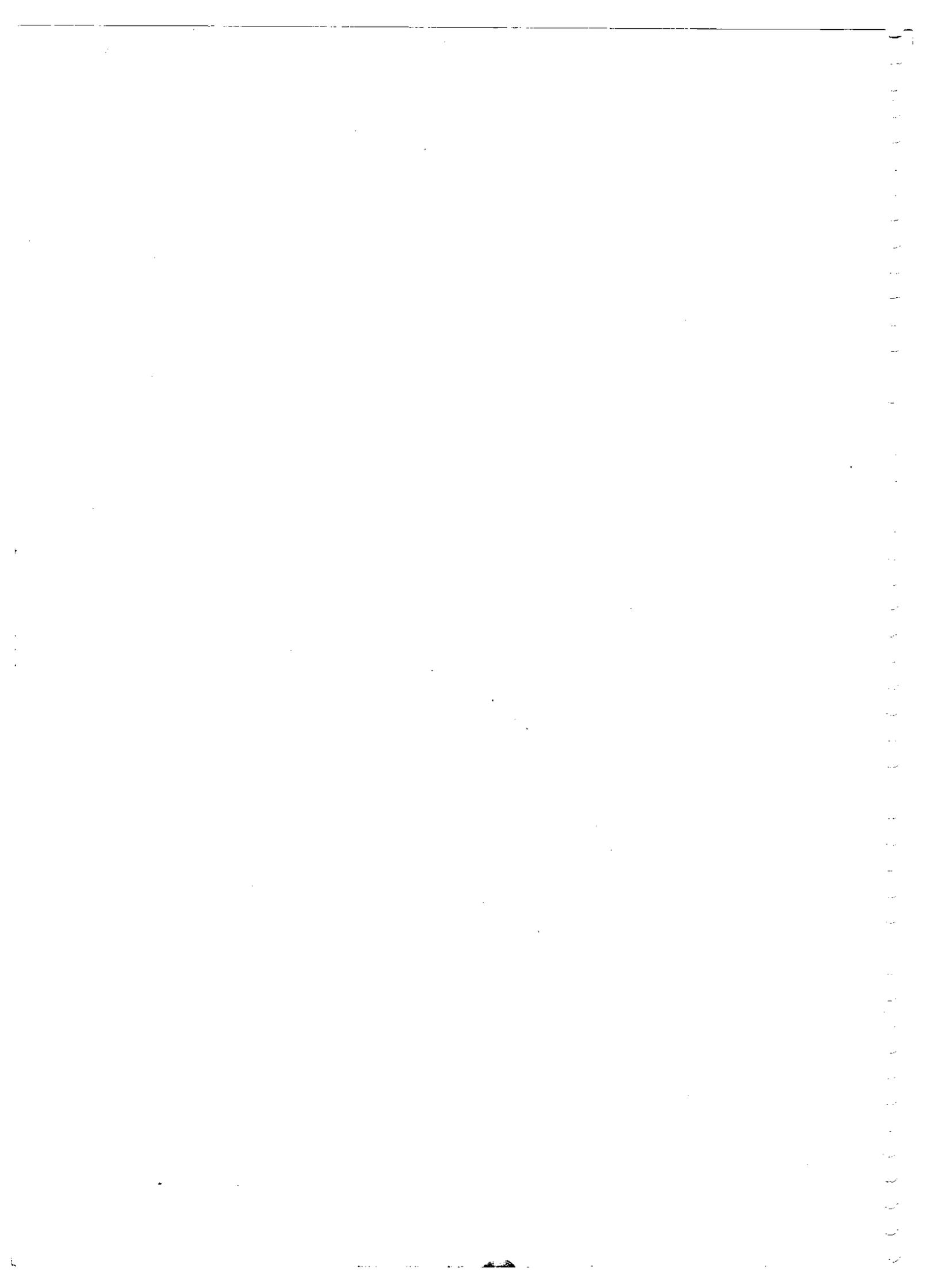
Método 2 : En este caso, los termómetros son calibrados en su posición correcta. La temperatura media de la columna emergente se podrá determinar mediante el empleo de termómetros de columna. La expresión 17 del apartado 5.4.3. permitirá referir las indicaciones de los termómetros a una temperatura ambiente prefijada.

Método 3 : Este método es similar al método 2 pero, en este caso, termómetros ordinarios son empleados en la determinación de la temperatura media de la columna emergente.

Los tres métodos presentan una gran similitud en sus resultados hasta una temperatura aproximada de 100°C. Para temperaturas superiores, los resultados obtenidos mediante la aplicación del método 3 muestran fuertes desviaciones con los obtenidos empleando los métodos 1 y 2, por lo que para este caso se recomienda el uso de cualquiera de estos dos últimos. Sin embargo, teniendo presente la desventaja ya mencionada en la descripción del método 1, para temperaturas superiores a 300°C se aconseja la aplicación del método 2 [35].

Cuando no se requiere gran exactitud en las medidas realizadas con un termómetro de inmersión parcial, los valores de  $C_e$  son referidos a la temperatura ambiente prevaleciente en el momento de la calibración. Esta última se realizará introduciendo el termómetro en el baño de comparación en su posición correcta, comparando sus indicaciones con las indicaciones correspondientes a dos termómetros patrones. En este caso no se efectúan correcciones por columna emergente.

Es obvio, por las condiciones de calibración, que la exactitud de las medidas realizadas con un termómetro de inmersión parcial, será sensiblemente menor a la exactitud obtenida con un termómetro de inmersión total. La imposibilidad de reproducir exactamente la temperatura del medio que rodeaba a la columna emergente en el momento de la calibración y las dificultades inherentes en la determinación de la misma, ya sea utilizando termómetros de columna o auxiliares, son causa de ello. De ahí la observación dada en la última parte del apartado 6.5.2.



## 7. Termómetros para usos especiales

### 7.1. TERMOMETROS BECKMANN

Estos termómetros se construyen con el fin de medir con gran exactitud pequeñas diferencias de temperaturas, y son diseñados en tal forma, para permitir que una cierta cantidad de Hg pueda ser retirada o introducida dentro del bulbo y, conseguir con ello, que el mismo termómetro pueda ser empleado en distintos rangos de temperaturas.

En su aspecto más común, el termómetro Beckmann posee un gran bulbo que está unido a un capilar fino sostenido por la escala por medio de un capilar de mayor diámetro. El tope superior del capilar, por donde el volumen de Hg contenido en el bulbo puede ser variado, es construido bajo dos formas posibles (figura 7.1.). La escala de estos termómetros cubre pocos grados, usualmente no más de  $5^{\circ}\text{C}$  ó  $6^{\circ}\text{C}$  y está graduada en intervalos de temperatura de  $0,01^{\circ}\text{C}$  ó  $0,02^{\circ}\text{C}$ .

Para realizar una medición con este tipo de termómetro, habrá que introducir o retirar una cierta cantidad de Hg de su bulbo, mediante una serie de manipulaciones, hasta que el menisco de la columna coincida aproximadamente con la división de la escala correspondiente al  $0^{\circ}\text{C}$ , cuando el termómetro sea introducido dentro de un baño de comparación que se encuentre a una temperatura de ajuste determinada. Esta última se define como la temperatura a que debe estar expuesto el bulbo para que el menisco de la columna de Hg coincida dentro de ciertos límites, con la división del  $0^{\circ}\text{C}$ . Así por ejemplo, para realizar una medida diferencial comprendida entre  $23^{\circ}\text{C}$  y  $24^{\circ}\text{C}$  o entre  $56^{\circ}\text{C}$  y  $59^{\circ}\text{C}$ , se pueden tomar como temperaturas de ajuste a los valores de  $20^{\circ}\text{C}$  y  $55^{\circ}\text{C}$  respectivamente.

Es necesario hacer notar que cuando la cantidad de Hg contenida en el bulbo del termómetro Beckmann se hace variar para permitir la realización de una medida diferencial en otro rango de temperaturas, la cantidad de Hg que es afectada por un cambio de temperatura es diferente. En otras palabras, dos variaciones iguales de temperaturas para diferentes temperaturas de ajuste producirán distintos cambios

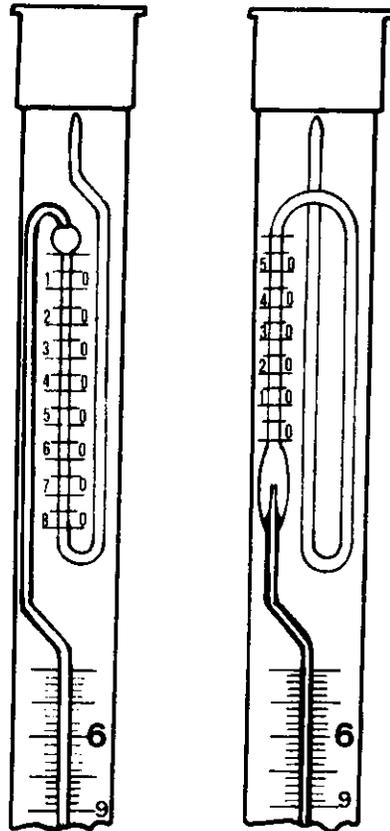


Figura 7-1

de indicaciones sobre la escala. Como consecuencia de esto último, la definición de corrección de la escala  $C_e$  que se dio en 6.1. no es la apropiada para este tipo de termómetros (recuérdese que en caso de los termómetros de rango fijo, la cantidad de Hg afectada por un cambio de temperatura es siempre la misma) y por ello convendrá introducir una nueva definición para la corrección de la escala que se aplicará a las indicaciones de los termómetros Beckmann, bajo la siguiente forma:

- a) La corrección  $C_e$  para la división de la escala correspondiente al  $0^\circ\text{C}$  es igual a cero.
- b) Para el resto de las divisiones de la escala, la corrección que se aplicará será:

$$C_e = (t - t_a) - (I - I_a) \quad (30)$$

en donde :

- $t_a$  : es la temperatura de ajuste.
- $I_a$  : es la indicación del termómetro cuando el bulbo se encuentra expuesto a la temperatura  $t_a$ .
- $I$  : es la indicación del termómetro cuando el bulbo se encuentra expuesto a la temperatura  $t$ .

Los termómetros Beckmann son siempre calibrados para una temperatura de ajuste de  $20^\circ\text{C}$  y, por lo tanto, las correcciones que se aplicarán sobre sus indicaciones serán referidas a esta última temperatura. Un factor, denominado de ajuste, permitirá, sin embargo, calcular las correcciones en otros rangos de temperatura (es decir, para otras temperaturas de ajuste) a partir de las correcciones determi

nadas experimentalmente durante la calibración.

### 7.1.1. Calibración de un termómetro Beckmann.

Antes de proceder a realizar la calibración, el termómetro Beckmann será sometido a una inspección ocular, para verificar si su estado es satisfactorio, ya que todos los defectos que se han detallado en el capítulo 4 pueden afectar también sus indicaciones. Cuando ello ocurra, las técnicas que se emplean para eliminarlos son similares a las que se aplican en cualquier termómetro ordinario. Si se concluye que el termómetro se encuentra en buenas condiciones, el mismo será ajustado a una temperatura de ajuste  $t_a = 20^\circ\text{C}$ , evitando que restos de Hg queden adheridos a las paredes del tubo capilar. Ciertas condiciones deberán verificarse durante la calibración:

- a) Las lecturas se efectuarán generalmente en las divisiones principales de la escala, es decir, 0, 1, 2, ..., n, y en cada una de ellas, en el momento de la observación, el menisco de la columna de Hg deberá estar situado dentro del intervalo  $i \pm 0,05$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ).
- b) La temperatura de ajuste deberá estar comprendida dentro del intervalo  $20 \pm 0,05^\circ\text{C}$ .

En la calibración, las indicaciones del termómetro Beckmann ya sea de inmersión total o parcial, se compararán con las indicaciones correspondientes a dos termómetros patrones comunes, o bien, de dos termómetros Beckmann patrones, y sus lecturas se efectuarán en forma similar a lo ya detallado en el apartado 6.4., empleando para ello también dos observadores.

#### 7.1.1.1. Calibración de un termómetro Beckmann de inmersión total, empleando dos termómetros patrones comunes

Los termómetros Beckmann a calibrar, conjuntamente con los termómetros patrones, serán introducidos dentro de un baño de comparación. La primera observación corresponderá a la división del  $0^\circ\text{C}$  para lo cual el baño de comparación se regulará a la temperatura de  $20 \pm 0,05^\circ\text{C}$ . En estas condiciones, el menisco de la columna de Hg de cada uno de los termómetros Beckmann, deberá estar situado dentro del intervalo de  $0 \pm 0,05^\circ\text{C}$ . De no ser así, se procederá a retirar o introducir la cantidad necesaria de Hg de los bulbos de los termómetros hasta que se cumpla la condición exigida. Una vez verificada la observación en la división de  $0^\circ\text{C}$ , se regulará la temperatura del baño de comparación con el fin de proceder a efectuar una nueva lectura, pero ahora en la división de la escala correspondiente a  $1 \pm 0,05^\circ\text{C}$ , y así en forma similar hasta que todas las correcciones sobre las restantes divisiones principales de la escala sean obtenidas. Una aplicación del cálculo de la corrección  $C_e$  en una calibración de dos termómetros Beckmann ( $E_1$  y  $E_2$ ) utilizando como patrones dos termómetros comunes ( $P_1$  y  $P_2$ ) se da en lo que sigue :

#### Comparación en la división de la escala de los termómetros Beckmann correspondiente al $0^\circ\text{C}$ .

	Termómetros			
	$P_1$	$E_1$	$E_2$	$P_2$
Observador A leyendo de izquierda a derecha	20,000	0,022	0,004	20,000
de derecha a izquierda	20,000	0,023	0,004	20,000
Observador B leyendo de derecha a izquierda	20,001	0,023	0,005	20,000
de izquierda a derecha	<u>20,001</u>	<u>0,023</u>	<u>0,005</u>	<u>20,000</u>
Promedio de las indicaciones	20,000 5	$I_a = 0,022 8$	$I_a = 0,004 5$	20,000

Lectura en el punto de hielo de los termómetros patrones después de la comparación.

Observador A	+0,016	+0,019
Observador B	+0,016	+0,019
Promedio	+0,016	+0,019
C <sub>0</sub>	-0,016	-0,019

Cálculo de la temperatura t<sub>a</sub>

Promedio de las indicaciones	20,000 5	0,022 8	0,004 5	20,000
Corrección reducida (de tablas de calibración)	C <sub>R</sub> -0,010 0			-0,003
Corrección del cero	C <sub>0</sub> -0,016 0			-0,019
Corrección por columna emergente	C <sub>c</sub> -			-
Temperatura verdadera	t <sub>p</sub> 19,974 5			19,978 0
Temperatura promedio	$\frac{t_{p1} + t_{p2}}{2} =$	t <sub>a</sub>	19,976 3	

Comparación en la división de la escala de los termómetros Beckmann correspondiente a 1°C.

	Termómetros			
	P <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	P <sub>2</sub>
Observador A leyendo de izquierda a derecha	21,000	1,010	0,999	20,990
de derecha a izquierda	21,000	1,010	0,999	20,990
Observador B leyendo de derecha a izquierda	21,003	1,013	1,002	20,992
de izquierda a derecha	21,003	1,013	1,003	20,993
Promedio de indicaciones	21,001 5	I <sub>1</sub> = 1,011 5	I <sub>1</sub> = 1,000 8	20,991 3

Lectura en el punto de hielo de los termómetros patrones después de la comparación.

Observador A	+0,016	+0,019
Observador B	+0,016	+0,019
Promedio	+0,016	+0,019
C <sub>0</sub>	-0,016	-0,019

Cálculo de la corrección C<sub>e</sub> en E<sub>1</sub> y E<sub>2</sub> para la división de la escala correspondiente a 1°C

Promedio de indicaciones	21,001 5	1,011 5	1,000 8	20,991 3
Corrección reducida (de tablas de calibración)	C <sub>R</sub> : -0,02			-0,003
Corrección del cero	C <sub>0</sub> : -0,016			-0,019
Temperatura verdadera	t <sub>p</sub> : 20,965 5			20,969 3
Temperatura promedio	$\frac{t_{p1} + t_{p2}}{2} = t_1$	20,967 4		
Diferencia t <sub>1</sub> - t <sub>a</sub>		0,991 1		
Diferencia I <sub>1</sub> - I <sub>a</sub>		0,988 7	0,996 3	
C <sub>e</sub> (de la expresión 30)		+0,002 4	-0,005 2	

7.1.1.2. Calibración de termómetros Beckmann de inmersión total empleando dos termómetros Beckmann patrones.

El procedimiento a seguir será similar al detallado en el apartado anterior, ajustando todos los termómetros Beckmann (inclusive los patrones) a la temperatura de ajuste de  $20 \pm 0,05^\circ\text{C}$ . Lo que sigue es un ejemplo numérico del cálculo de la corrección  $C_e$  aplicable a este caso.

Comparación en la división de la escala de los termómetros Beckmann correspondiente al  $0^\circ\text{C}$ .

	Termómetros			
	$P_{B1}$	$E_1$	$E_2$	$P_{B2}$
Observador A leyendo de izquierda a derecha	0,019	0,039	0,021	0,000
de derecha a izquierda	0,023	0,044	0,025	0,000
Observador B leyendo de derecha a izquierda	0,030	0,049	0,029	0,005
de izquierda a derecha	<u>0,030</u>	<u>0,050</u>	<u>0,034</u>	<u>0,010</u>
Promedio indicaciones $I_a$	0,025 5	0,045 5	0,027 2	0,003 8

Comparación en la división de la escala de los termómetros Beckmann correspondiente a  $1^\circ\text{C}$ .

Observador A leyendo de izquierda a derecha	1,013	1,033	1,023	0,993
de derecha a izquierda	1,016	1,035	1,024	0,993
Observador B leyendo de derecha a izquierda	1,020	1,039	1,027	0,998
de izquierda a derecha	<u>1,020</u>	<u>1,040</u>	<u>1,029</u>	<u>1,000</u>
Promedio indicaciones $I_1$	1,017 2	1,036 8	1,025 8	0,996 0

Cálculo de la corrección  $C_e$  en  $E_1$  y  $E_2$  para la división de la escala correspondiente a  $1^\circ\text{C}$ .

Diferencia $I_1 - I_a$	0,991 7	0,991 3	0,998 6	0,992 2
Corrección $C_e$ de los termómetros patrones (de tablas de calibración)	+0,006			+0,001
Diferencia de temperatura medida por los termómetros patrones deducida a partir de $I_1 - I_a + C_e = t_1 - t_a$	0,997 7			0,993 2
Promedio de las diferencias de temperatura		0,995 4		
Corrección $C_e$ de las indicaciones de $E_1$ y $E_2$ aplicando la expresión 30		+0,004 1	-0,003 2	

7.1.2. Determinación de las correcciones  $C_e$  en las indicaciones de un termómetro Beckmann de inmersión total en otros rangos de temperatura

Las correcciones  $C_e$  que se aplicarán sobre las indicaciones de un termómetro Beckmann de inmersión total para una temperatura de ajuste distinta de  $20^\circ\text{C}$ , podrán ser calculadas de los valores de  $C_e$  obtenidos durante la calibración, a partir de la relación :

$$C_i(t_a) = C_i(20) + i \cdot (K - 1) \quad (31)$$

en donde :

- $i$  : es igual a  $1^{\circ}\text{C}$ ,  $2^{\circ}\text{C}$ , ...,  $n^{\circ}\text{C}$ .
- $C_i(20)$  : es la corrección  $C_e$  para la indicación  $i$  de la escala del termómetro correspondiente a una temperatura de ajuste de  $20^{\circ}\text{C}$ .
- $C_i(t_a)$  : es la corrección  $C_e$  que se aplicará a la indicación  $i$  de la escala del termómetro para una temperatura de ajuste  $t_a$  distinta de  $20^{\circ}\text{C}$ .
- $K$  : es el factor de ajuste  $\underline{0}$  de la escala, cuyo valor depende de la temperatura de ajuste  $t_a$ , de la clase de vidrio con el cual fue construido el termómetro y de la temperatura de la columna  $t_c$  si ésta es diferente de  $t_a$ . Obviamente para  $t_a = 20^{\circ}\text{C}$  es  $K = 1$ .

La tabla 7.1. indica valores característicos de  $K$  para un termómetro Beckmann de inmersión total y para dos clases de vidrio con los cuales son construidos generalmente.

Tabla 7.1.  
Factor de ajuste para un termómetro Beckmann de inmersión total

Temperatura de ajuste : $t_a$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Factor de ajuste : $K$	
	Vidrio Normal 16'''	Vidrio N° 2954
- 20	0,986 2	0,988 5
- 15	0,988 1	0,990 1
- 10	0,990 0	0,991 7
- 5	0,991 8	0,993 2
0	0,993 6	0,994 7
5	0,995 2	0,996 1
10	0,996 9	0,997 4
15	0,998 5	0,998 7
20	1,000 0	1,000 0
25	1,001 5	1,001 2
30	1,002 9	1,002 4
35	1,004 2	1,003 5
40	1,005 5	1,004 5
45	1,006 8	1,005 5
50	1,008 0	1,006 5
55	1,009 1	1,007 4
60	1,010 2	1,008 3
65	1,011 2	1,009 1
70	1,012 2	1,009 8
75	1,013 1	1,010 5
80	1,013 9	1,011 2
85	1,014 7	1,011 8
90	1,015 5	1,012 3
95	1,016 2	1,012 8
100	1,016 8	1,013 3
105	1,017 4	1,013 7
110	1,017 9	1,014 0
115	1,018 3	1,014 3
120	1,018 7	1,014 6
125	1,019 1	1,014 8
130	1,019 4	1,014 9
135	1,019 6	1,015 0
140	1,019 8	1,015 1

Como una aplicación de la expresión (31), consideremos ahora el siguiente ejemplo : En la calibración de un termómetro Beckmann de inmersión total construido con vidrio normal 16" se han obtenido los siguientes valores de  $C_i (20)$  :

$i$ (°C)	$C_i (20)$ (°C)
1	+ 0,002
2	- 0,001
3	- 0,003
4	+ 0,000
5	+ 0,003

Con estos valores, las correcciones  $C_i (t_a)$  que se aplicarán sobre las  $i$  indicaciones del termómetro, para una temperatura de ajuste  $t_a \neq 20^\circ\text{C}$ , podrán ser deducidas inmediatamente a partir de la expresión (31). Por ejemplo, para una temperatura de ajuste  $t_a = 50^\circ\text{C}$  se tendrá, sabiendo que  $K = 1,008$ , que :

$$\begin{aligned} C_1 (50) &= 0,010^\circ\text{C} \\ C_2 (50) &= 0,015^\circ\text{C} \\ C_3 (50) &= 0,021^\circ\text{C} \\ C_4 (50) &= 0,032^\circ\text{C} \\ C_5 (50) &= 0,043^\circ\text{C} \end{aligned}$$

### 7.1.3. Calibración de un termómetro Beckmann de inmersión parcial

Un termómetro Beckmann puede ser calibrado también como un termómetro de inmersión parcial. En tal caso, las indicaciones del termómetro sólo serán correctas cuando el bulbo y una parte especificada de la columna, que en general contiene el capilar de mayor diámetro, se encuentran expuestos a la misma temperatura. Estos termómetros son siempre calibrados para una temperatura de ajuste de  $20^\circ\text{C}$  y para una temperatura media de la columna emergente de  $20^\circ\text{C}$ . Las correcciones que se aplicarán a sus indicaciones para otras temperaturas de ajuste podrán ser calculadas a partir de la expresión (31) y los valores de los factores de ajuste, deducidos de la tabla 7.2., valores válidos, como puede observarse, sólo para una determinada temperatura media de la columna emergente.

Durante la calibración, las indicaciones del termómetro Beckmann serán comparadas con las indicaciones de dos termómetros patrones que podrán ser del tipo común o bien Beckmann, en la misma forma que se ha detallado en 7.1.1.1. Una vez que el termómetro se ha ajustado a la temperatura de  $20^\circ\text{C}$  se sumergirá "completamente" conjuntamente con los termómetros patrones, en un baño de comparación. En primer lugar, y por los motivos que se verán más adelante, se determinará la temperatura de inmersión  $t_i$  definida esta última como la temperatura a la que deberá estar expuesto el bulbo de un termómetro Beckmann que ha sido ajustado a la temperatura de  $20^\circ\text{C}$ , para que el menisco de la columna de Hg se encuentre al mismo nivel que la línea de inmersión. Esta se encuentra ubicada generalmente sobre la unión de los dos capilares del termómetro, tal como puede observarse en la figura 7.2.

Las observaciones sobre las  $i$  indicaciones del termómetro se realizarán en la misma forma y condiciones que se han detallado en 7.1.2.1.

Tabla 7.2.  
Factores de ajuste para un termómetro Beckmann de inmersión parcial

Temperatura de ajuste $t_a$ (°C)	Temperatura media de la columna emergente (°C)	Factor de Ajuste K	
		Vidrio normal 16'''	Vidrio N° 2954
-20	12	0,981 2	0,983 3
-15	13	0,983 8	0,985 6
-10	14	0,986 3	0,987 8
- 5	15	0,988 7	0,989 9
0	16	0,991 0	0,992 1
5	17	0,993 4	0,994 1
10	18	0,995 6	0,996 1
15	19	0,997 8	0,998 1
20	20	1,000 0	1,000 0
25	21	1,002 1	1,001 9
30	22	1,004 2	1,003 7
35	23	1,006 4	1,005 4
40	24	1,008 1	1,007 2
45	25	1,010 0	1,008 8
50	26	1,011 8	1,010 5
55	27	1,013 6	1,012 0
60	28	1,015 3	1,013 5
65	29	1,017 0	1,015 0
70	30	1,018 6	1,016 4
75	31	1,020 1	1,017 8
80	32	1,021 6	1,019 1
85	33	1,023 1	1,020 4
90	34	1,024 5	1,021 6
95	35	1,025 8	1,022 8
100	36	1,027 1	1,023 9
105	37	1,028 3	1,025 0
110	38	1,029 5	1,026 0
115	39	1,030 6	1,027 0
120	40	1,031 6	1,027 9
125	41	1,032 6	1,028 7
130	42	1,033 6	1,029 6
135	43	1,034 4	1,030 3
140	44	1,035 3	1,031 0

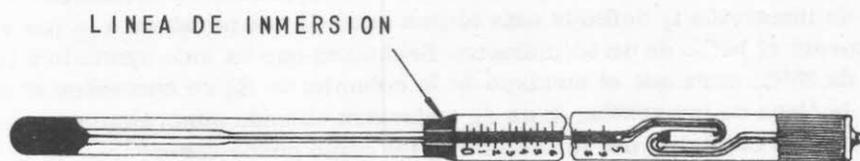


Figura 7.2.

Hemos establecido que una de las condiciones que se imponen a las correcciones  $C_e$  que son obtenidas durante la calibración de estos termómetros, es que las mismas tienen que ser referidas a una temperatura media de la columna de  $20^\circ\text{C}$ . Esto significa que será necesario aplicar sobre las indicaciones del termómetro, correcciones adicionales que contemplen la condición mencionada. Estas últimas podrán ser calculadas a partir de la expresión :

$$C_c = (N + M) \delta (t_m - t) \quad (32)$$

en donde :

- $N$  : es la indicación sobre la escala del termómetro, del menisco de la columna de Hg.
- $M$  : se define como la diferencia en grados Celsius que existe entre la temperatura de  $20^\circ\text{C}$  correspondiente a la graduación de  $0^\circ\text{C}$  sobre la escala y la temperatura  $t_i$ .
- $t_m$  : es la temperatura de la columna emergente, a la que deberán referirse los valores de las correcciones de la escala (en este caso  $20^\circ\text{C}$ ).
- $t$  : es la temperatura a la que está expuesto el bulbo del termómetro.
- $\delta$  : es el coeficiente de expansión cúbica relativo del Hg respecto del vidrio con el cual fue construido el termómetro, para una temperatura  $T = \frac{t_m + t}{2}$ .

Como una aplicación de la expresión (32) consideremos el siguiente ejemplo : En la primera fase de la calibración de un termómetro Beckmann de inmersión parcial, construido con vidrio normal 16", se han determinado las siguientes correcciones sobre las indicaciones del termómetro :

$i$ ( $^\circ\text{C}$ )	$C_i$ ( $^\circ\text{C}$ )
1	+ 0,002
2	+ 0,001
3	+ 0,000
4	+ 0,000
5	+ 0,002

Las correcciones adicionales  $C_{ci}$  para la profundidad de inmersión prescrita y para una temperatura media de la columna de  $20^\circ\text{C}$ , podrán ser obtenidas a partir de la expresión (32). En efecto, si suponemos que  $t_i = 18,27^\circ\text{C}$ ,  $t_m = 20^\circ\text{C}$  y  $\delta = 158.10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , se tendrá que :

$$C_{c1} = (1 + 1,73) 158.10^{-6} (20 - 21) = 0,000$$

$$C_{c2} = (2 + 1,73) 158.10^{-6} (20 - 22) = -0,001$$

$$C_{c3} = (3 + 1,73) 158.10^{-6} (20 - 23) = -0,002$$

$$C_{c4} = (4 + 1,73) 158.10^{-6} (20 - 24) = -0,004$$

$$C_{c5} = (5 + 1,73) 158.10^{-6} (20 - 25) = -0,005$$

La corrección total de la escala, para cada indicación del termómetro, será igual a la suma algebraica de las correcciones  $C_i$  y  $C_{ci}$ , es decir :

$$C_i(20) = C_i + C_{ci}$$

Reemplazando los valores obtenidos anteriormente, se tendrá que :

$$C_1 (20) = + 0,002^{\circ}\text{C}$$

$$C_2 (20) = 0,000^{\circ}\text{C}$$

$$C_3 (20) = - 0,002^{\circ}\text{C}$$

$$C_4 (20) = - 0,004^{\circ}\text{C}$$

$$C_5 (20) = - 0,003^{\circ}\text{C}$$

#### 7.1.4. Correcciones por columna emergente

Al igual que en el caso de los termómetros ordinarios, podrán aplicarse correcciones por columna emergente, sobre las indicaciones de un termómetro Beckmann, si las condiciones existentes durante su uso no son similares a las que se refiere la tabla de calibración. Estas correcciones son idénticas a las aplicadas en cualquier termómetro ordinario. Sin embargo, si se tiene en cuenta que un termómetro Beckmann es utilizado para medir diferencias de temperatura, las correcciones por columna emergente podrán aplicarse directamente sobre estas últimas. Dos casos se presentan generalmente y a ellos nos referiremos en lo que sigue.

1er. caso : Un termómetro Beckmann de inmersión parcial es sumergido correctamente, pero la temperatura media de la columna emergente para la temperatura  $t_a$  a la que fue ajustado, no es la correcta, según tabla 7. 2. En estas circunstancias, si representamos con  $L_1$  y  $L_2$  a las lecturas inicial y final respectivamente, obtenidas durante la medición, y si la temperatura media de la columna emergente se mantuvo sensiblemente constante durante la misma, la corrección que se aplicará sobre la diferencia de temperatura medida será :

$$C_c = \delta (L_2 - L_1) (t_m - t_c) \quad (33)$$

en donde :

$t_m$  : es la temperatura que debe poseer la columna del termómetro Beckmann para que los valores de la tabla de calibración sean correctos.

$t_c$  : es la temperatura media de la columna del termómetro durante la medición y que puede ser determinada por los medios descritos anteriormente.

$\delta$  : es el coeficiente de expansión cúbica relativo del Hg con respecto al vidrio con el cual fue construido el termómetro, para una temperatura  $T = \frac{t_m + t_i}{2}$

2do. caso : Un termómetro Beckmann ha sido calibrado como un termómetro de inmersión total, pero es usado parcialmente sumergido. Si en estas condiciones la temperatura de la columna emergente durante la medición se mantiene sensiblemente constante, la corrección que se aplicará sobre la diferencia de las lecturas  $L_1$  y  $L_2$  será :

$$C_c = \delta (L_2 - L_1) (t_a + m + L_1 + L_2 - t_c) \quad (34)$$

en donde :

$L_1$  y  $L_2$  : tienen el mismo significado que en la expresión (33).

$t_a$  : es la temperatura de ajuste.

$t_c$  : es la temperatura media de la columna emergente.

$m$  : es el número de grados que debe descender el menisco de la columna

de Hg desde la división de la escala correspondiente al 0°C al nivel de inmersión.  $m$  tiene un valor finito y positivo si el nivel de inmersión se encuentra por debajo de la graduación del 0°C de la escala y es igual a cero cuando dicho nivel coincide con cualquiera de las divisiones de la escala.

#### 7.1.5. Tolerancia y exactitud de un termómetro Beckmann

Por el hecho de ser el termómetro Beckmann, un termómetro de características especiales, la definición de tolerancia dada en el apartado 6.5.1. no es la adecuada para este caso. Es por ello que se conviene en definir a la tolerancia de un termómetro Beckmann como el máximo valor que puede tener la diferencia entre las correcciones  $C_e$  correspondientes a dos divisiones cualquiera de la escala, dependiendo dicho valor, ya sea que dichas divisiones estén separadas por una distancia equivalente a 1°C o más, tal como puede apreciarse en la tabla 7.3.

Tabla 7.3.

Escala graduada en intervalos de temperaturas de: (°C)	Diferencia máxima de las correcciones $C_e$ para un intervalo de temperatura de 1°C de separac. (°C)	Diferencia máxima de las correcciones $C_e$ para un intervalo de temperatura de más de 1°C de separación (°C)	Exactitud del intervalo (°C)
0,01	0,01	0,02	0,002 a 0,005
0,02	0,02	0,04	0,005 a 0,01

Los valores de las tolerancias serán válidos para una temperatura de ajuste de 20°C.

Un ejemplo permitirá aclarar estos conceptos. Supongamos que en la calibración de un termómetro Beckmann graduado en intervalos de temperatura de 0,01°C y que ha sido ajustado a la temperatura  $t_a = 20^\circ\text{C}$ , se han obtenido los siguientes valores de  $C_e$ :

$i$ (°C)	$C_e$ (°C)
1	- 0,01
2	0,00
3	+ 0,01
4	+ 0,02
5	+ 0,01
6	0,00

En primer lugar, se controlará las diferencias existentes entre las correcciones que corresponden a un intervalo de temperaturas de 1°C. Así por ejemplo, para las divisiones de 1°C y 2°C ó 5°C y 6°C se observa que las diferencias entre las correspondientes correcciones no exceden de 0,01°C. Un resultado similar se obtendrá al considerar las restantes diferencias. A pesar de ello, todavía no es posible asegurar que el termómetro está dentro de las tolerancias exigidas. En efecto, si se comparan las correcciones correspondientes a las indicaciones de 1°C y 4°C se encontrará que su diferencia es de 0,03°C, es decir, mayor que el valor máximo permitido según la tercera columna de la tabla 7.3. En este caso se dirá que el termómetro

está fuera de tolerancia, y su uso no es aconsejable.

La cuarta columna de la tabla 7.3. da los valores de exactitud que es posible esperar en las mediciones, cuando el termómetro está dentro de las tolerancias exigidas, es usado en forma correcta y todas las correcciones posibles han sido aplicadas sobre las indicaciones del mismo.

## 7.2. TERMOMETROS DE COLUMNA

En el apartado 5.4. nos hemos referido ampliamente al uso y utilidad que prestan estos termómetros en la determinación de las correcciones por columna emergente.

Los termómetros de columna son construidos con un bulbo de gran longitud, usualmente comprendida entre 5 cm y 20 cm de largo, pero de tal forma que la cantidad de Hg contenido por el mismo será igual a la de un termómetro ordinario que abarque el mismo rango de temperaturas. Pueden ser además de dos tipos diferentes : de escala interna o de escala externa.

La tabla 7.4. da una indicación acerca de los termómetros de columna que son generalmente empleados en la práctica.

Tabla 7.4.

Longitud del bulbo (cm)	Rango de temperaturas que cubre la escala (°C)	Escala graduada en intervalos de temperaturas de : (°C)
5	10 a 200	1 a 2
5	10 a 200	1 a 2
5	200 a 600	2
10	-40 a 50	0,5
10	0 a 150	1
10	150 a 300	1

Estos termómetros se calibran totalmente sumergidos comparando sus indicaciones con las correspondientes a dos termómetros patrones. Las correcciones obtenidas serán, después, referidas a una temperatura media de la columna de 20°C. Para esto último será necesario conocer obviamente la longitud de la columna del líquido termométrico, o más precisamente, la diferencia que existe en grados Celsius entre la indicación del termómetro y la temperatura  $t_0$  que corresponde cuando el menisco de la columna del líquido termométrico se encuentra al mismo nivel que el extremo superior de su bulbo.

Estos conceptos se aclaran en el ejemplo siguiente : Supongamos que durante la calibración de un termómetro de columna de Hg construido con vidrio normal 16" se han obtenido una serie de datos cuyos valores pueden deducirse de la figura 7.3. en donde, para simplificar, se ha hecho omisión de los termómetros patrones.

Aplicando la expresión (28) y teniendo en cuenta que para este caso es :

$$\frac{t_{p1} + t_{p2}}{2} = 99,92^{\circ}\text{C}$$

se tendrá que :

$$C_{100} = 99,92 - 100 - C_c$$

en donde  $C_c = (t_i - t_o) \delta (t_m - t_c)$ , que se puede deducir de la expresión (17).

Sabiendo que :

$$t_i = 100^\circ\text{C}$$

$$t_m = 20^\circ\text{C}$$

$$t_o = -20^\circ\text{C}$$

$$t_c = t_B = 99,92^\circ\text{C}$$

$$\text{y } \delta = 158 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

será :  $C_c = -1,51^\circ\text{C}$

Luego :  $C_{100} = +1,43^\circ\text{C}$

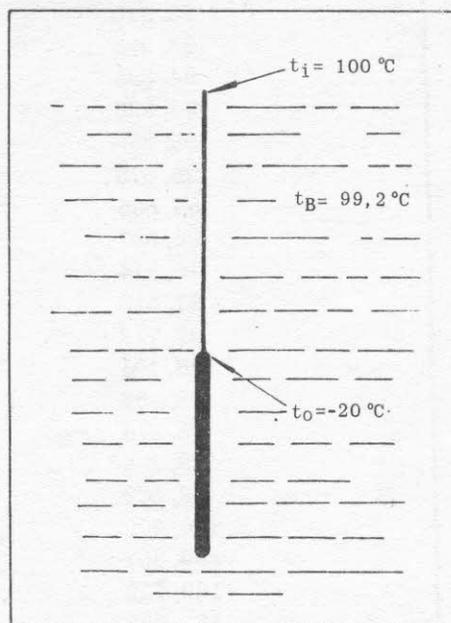


Figura 7-3

En la práctica, es difícil que la temperatura media de la columna de estos termómetros sea exactamente de  $20^\circ\text{C}$ , pero a menos que la temperatura del medio que la rodea sea muy diferente de este valor, no habrá necesidad de efectuar sobre sus indicaciones, correcciones por columna. En tal caso, la temperatura de esta última podrá determinarse con el empleo de un termómetro común u otro termómetro de columna, tal como se describió en capítulos anteriores.

### 7.3. TERMOMETROS HIPSOMETRICOS

Son termómetros que se emplean para medir la presión atmosférica a partir de la temperatura de ebullición del agua pura. Su escala viene graduada en mm de Hg o mbar. Pueden ser también de escala interna o de escala externa.

Durante la calibración de estos termómetros, será necesario la utilización de una curva que represente la temperatura de ebullición del agua pura, como función de la presión atmosférica, o bien de una tabla similar a las tablas 7.5.1. y 7.5.2.

La técnica empleada en la calibración de un termómetro hipsométrico será similar a la aplicada en la calibración de cualquier termómetro común; el termómetro sumergido completamente en un baño de comparación conjuntamente con dos termómetros patrones y observaciones realizadas para varios valores de temperatura. Estas serán deducidas directamente de las indicaciones de los termómetros patrones, mientras que los valores correspondientes de la presión atmosférica serán obtenidos indirectamente a través de las tablas 7.5.1. y 7.5.2. El conocimiento de estos últimos valores nos permitirá compararlos con los correspondientes valores de presión señalados por el termómetro hipsométrico y de este modo establecer las correcciones, si las hay, de sus indicaciones.

Tabla 7.5.1.

Presión P (mm de Hg)	Temperatura de ebullición (°C)	$\Delta P/\Delta t$ (mm de Hg/°C)
570	92,136	21,2
580	92,600	21,5
590	93,058	21,8
600	93,510	22,1
610	93,955	22,4
620	94,395	22,7
630	94,828	23,0
640	95,256	23,3
650	95,678	23,7
660	96,095	24,0
670	96,507	24,3
680	96,914	24,6
690	97,315	24,9
700	97,712	25,2
710	98,105	25,5
720	98,492	25,8
730	98,876	26,1
740	99,255	26,4
750	99,629	26,7
760	100,000	27,0
770	100,367	27,3
780	100,729	27,6
790	101,088	28,0
800	101,443	28,3

Si una observación es realizada a una temperatura  $t$ , cuyo valor no coincide con algunos de los valores suministrados en las tablas 7.5.1 y 7.5.2, el valor correspondiente de presión se podrá determinar utilizando el cociente  $\Delta P/\Delta t$  del intervalo de temperaturas en la que  $t$  se encuentra comprendida. En efecto, si establecemos la relación :

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{P - P_0}{t - t_0} \quad (35)$$

se podrá deducir que :

$$P = P_0 + \frac{\Delta P}{\Delta t}(t - t_0) \quad (36)$$

en donde  $t_0$  es el valor inferior más cercano al valor de  $t$  y  $P_0$  es la presión correspondiente a  $t_0$  deducidas ambas de las tablas 7.5.1. y 7.5.2.

Tabla 7.5.2.

Presión P ( mbar )	Temperatura de ebullición (°C)	$\Delta P / \Delta t$ (mbar/°C)
760	92,138	28,4
770	92,486	28,7
780	92,831	29,0
790	93,173	29,3
800	93,512	29,6
810	93,846	29,9
820	94,177	30,2
830	94,506	30,5
840	94,830	30,8
850	95,152	31,1
860	95,470	31,4
870	95,785	31,7
880	96,097	32,0
890	96,407	32,3
900	96,713	32,6
910	97,017	32,9
920	97,318	33,2
930	97,616	33,6
940	97,911	33,9
950	98,204	34,2
960	98,495	34,5
970	98,783	34,8
980	99,068	35,1
990	99,351	35,4
1 000	99,632	35,7
1 010	99,910	36,0
1 020	100,186	36,3
1 030	100,460	36,6
1 040	100,732	36,9
1 050	101,001	37,2

Consideremos ahora el siguiente ejemplo : Supongamos que los termómetros patrón indican en el momento de la observación una temperatura promedio  $t = 98,450$  °C. La presión atmosférica correspondiente a esta temperatura se podrá deducir de la expresión (36), es decir :

$$P = 710 + 25,5 (98,450 - 98,105) = 718,80 \text{ mm de Hg}$$

ya que :  $t_0 = 98,105$ °C ;  $P_0 = 710$  mm de hg y  $\frac{\Delta P}{\Delta t} = 25,5$  mm de Hg/°C

Si el termómetro hipsométrico indica para la temperatura de  $98,450$ °C una presión  $P = 718,94$  mm de Hg, el error de la escala será :

$$E = 718,94 - 718,80 = 0,14 \text{ mm de Hg}$$

Luego, la corrección que se aplicará sobre la lectura será, si se desprecian todas las demás fuentes de errores :

$$C_e = -0,14 \text{ mm de Hg}$$

#### 7.4. TERMOMETROS PARA CALORIMETROS O CALORIMETRICOS

Son termómetros diseñados para medir con gran precisión pequeñas diferencias de temperaturas. Comparado con los termómetros Beckmann, los termómetros calorimétricos son termómetros de rango fijo. Usualmente sus escalas están graduadas en intervalos de temperatura de 0,01°C ó 0,02°C y su calibración se efectúa en forma similar a lo descrito en el apartado 6.4.

Las tolerancias y exactitudes que pueden esperarse de los termómetros calorimétricos, cuando los mismos han sido construidos con materiales adecuados y han sido sometidos a un adecuado tratamiento térmico, pueden ser deducidas de la tabla 7.6.

Tabla 7.6.

Escala graduada en intervalos de temperaturas de : (°C)	Diferencia máxima de las correcciones $C_c$ para un intervalo de temperatura de 1,5°C de separación (°C)	Exactitud del intervalo (°C)
0,01	0,01	0,005 a 0,01
0,02	0,02	0,005 a 0,01

Si un termómetro calorimétrico es usado en condiciones ambientales distintas para las que fue calibrado, se deberá aplicar sobre sus indicaciones correcciones por columna emergente. Sin embargo, teniendo en cuenta que estos termómetros son utilizados en medidas diferenciales de temperaturas, las mencionadas correcciones por columna podrán aplicarse directamente sobre estas últimas; en forma similar a lo considerado para termómetros Beckmann, pueden presentarse dos casos :

1er. caso : Un termómetro calorimétrico de inmersión parcial es usado correctamente, pero la temperatura de la columna emergente es distinta a la temperatura prefijada durante su calibración. Bajo estas condiciones si la temperatura media de la columna emergente durante la medición se mantiene sensiblemente constante, la corrección que se aplicará sobre la diferencia de temperatura medida será :

$$C_c = \delta (L_2 - L_1) (t_m - t_c)$$

en la que cada uno de los términos tienen el mismo significado que en la expresión (33).

2do. caso : Un termómetro calorimétrico de inmersión total es utilizado como un termómetro de inmersión parcial. Si durante la medición, la temperatura de la columna emergente se mantiene sensiblemente constante, la corrección por columna que se aplicará sobre el valor de una medida diferencial estará dada por :

$$C_c = \delta (L_2 - L_1) (L_1 + L_2 - I - t_c) \quad (37)$$

en donde I es la lectura sobre la escala del termómetro que se encuentra al mismo nivel que la superficie del líquido dentro del cual se lo ha sumergido y  $\delta, L_1, L_2$  y  $t_c$  tienen un significado similar al del apartado precedente. Ejemplo : Durante una medición, un termómetro calorimétrico se ha sumergido hasta la división de la escala correspondiente a 18°C. La lectura inicial fue de 20°C y la lectura final, de 25°C mientras la temperatura media de la columna emergente era de 20°C. Aplicando la expresión (37) la corrección será entonces :

$$C_c = 16 \cdot 10^{-5} (25 - 20) (25 + 20 - 18 - 20) = 0,006^\circ\text{C}$$

Luego, la diferencia verdadera de temperatura medida será :

$$\Delta L + C_c = 5,006^\circ\text{C}$$

### 7.5. TERMOMETROS CLINICOS

Los termómetros clínicos forman parte de los denominados termómetros de máxima (ver apartado 2.3.). El rango de sus escalas, que están graduadas en intervalos de temperaturas de  $0,1^\circ\text{C}$ , cubre  $7^\circ\text{C}$  extendiéndose desde los  $35^\circ\text{C}$  a  $42^\circ\text{C}$ . Este tipo de termómetros es utilizado principalmente en medicina, para la medición de la temperatura febril del cuerpo humano y deben ser expuestos un tiempo suficientemente largo (no menor de dos minutos) como para que todo el mercurio contenido por el termómetro adquiera una temperatura uniforme. Cuando la medición y lectura han sido efectuadas, la columna de Hg podrá ser introducida dentro del bulbo, mediante un movimiento mecánico abrupto realizado con la mano, o bien, mediante el empleo de una centrífuga.

Los termómetros clínicos son generalmente examinados en gran número, totalmente sumergidos en un baño adecuado en donde se compararán sus indicaciones con las correspondientes a dos termómetros patrones. Usualmente, las observaciones son efectuadas a las temperaturas de  $37^\circ\text{C}$ ,  $39^\circ\text{C}$  y  $41^\circ\text{C}$ . Aquellos cuyas indicaciones estén fuera de las tolerancias prescritas ( $\pm 0,1^\circ\text{C}$ ) serán desechados de inmediato, mientras que los restantes sometidos a un segundo examen. Durante este último los termómetros serán expuestos dentro del baño a una temperatura de  $41^\circ\text{C}$  y luego retirados del mismo y enfriados a temperatura ambiente. Si designamos con  $L_1$  el valor que indica cada termómetro cuando su bulbo es expuesto a una temperatura de  $41^\circ\text{C}$  (antes de cortarse la columna) y con  $L_2$  la indicación de cada termómetro cuando han sido enfriados a temperatura ambiente (después de cortarse la columna de Hg), entonces el valor :

$$L_2 + C_c - L_1 \quad (38)$$

deberá estar comprendido dentro de las tolerancias exigidas.  $C_c$  es la corrección por columna correspondiente a la indicación  $L_2$  y puede ser calculada a partir de la expresión :

$$C_c = \frac{L}{S} \delta (L_2 - t_c)$$

en donde :

$L$  : es la longitud de la columna de Hg después que ésta se ha cortado.

$S$  : es la sensibilidad del termómetro.

$t_c$  : es la temperatura de la columna del termómetro después de que este último ha sido enfriado a temperatura ambiente.

$\delta$  : es el coeficiente de expansión cúbica del Hg relativo con respecto al vidrio con el cual fue construido el termómetro para la temperatura  $t = \frac{L_2 + t_c}{2}$

## 7.6. TERMOMETROS INDUSTRIALES

Son diseñados y contruidos para ser utilizados, tal como su nombre lo indica, en mediciones de temperatura de tipo industrial, en donde no son necesarias medidas de gran exactitud. Debido a la forma en que son utilizados, deben ser de contexto fuerte y por ello usualmente están protegidos por una vaina metálica, para evitar con ello el daño que podría ocasionarse al termómetro si éste es colocado en contacto directo con la fuente de calor. La vaina metálica resulta ser fuente de algunos errores en la temperatura medida originados principalmente por el efecto de retardo, aunque este último puede ser disminuido, en gran parte, si se coloca en el espacio vacío existente entre el termómetro y la vaina metálica, alguna sustancia buena conductora del calor. Otras fuentes de errores lo constituye, algunas veces, el medio en que estos termómetros son sumergidos, como sucede, por ejemplo, en la medición de la temperatura de una masa de gas. En general, si sólo interesa medir cambios de temperatura, estos errores no son considerados. Si es necesario cierta exactitud en la medida, convendrá calibrar el termómetro, pero cuidando luego que las condiciones ambientales durante su uso sean similares a las existentes en el momento de su calibración. Por ello, será conveniente efectuar la calibración directamente en el lugar en donde el termómetro será utilizado.

## 8. Calibración de un termómetro de vidrio a temperaturas superiores a 550°C

Ciertos tipos de termómetros de vidrio, contruidos con vidrio Supremax o de cuarzo, son utilizados para medir temperaturas comprendidas entre 0°C y 630°C y entre 0°C y 1 000°C respectivamente. La calibración de estos termómetros en el rango comprendido entre 0°C y 550°C se llevará a cabo en la forma que se ha descrito en el apartado 6.4., utilizando como baños de comparación (ver apartado 12.3.) baños de agua, de aceite y de sales hasta las temperaturas de 100°C, 250°C y 550°C respectivamente. Para temperaturas superiores se emplean hornos eléctricos especialmente diseñados (ver apartado 12.4.) en donde los termómetros serán introducidos y sus indicaciones comparadas con las correspondientes a termocuplas patrones de Pt - Pt 10% Rd. Dado que los hornos eléctricos presentan, en general, un fuerte gradiente de temperatura en el sentido del eje longitudinal, la temperatura media de la columna del termómetro será diferente a la de su bulbo, por lo que en sus indicaciones será necesario aplicar correcciones por columna. El cálculo de estas últimas podrá ser realizado aplicando las fórmulas particulares para el caso, empleándose en la determinación de la temperatura media de la columna, termocuplas de Pt - Pt 10% Rd o, si es posible, termómetros de columna.

En lo que sigue describiremos un método práctico para llevar a cabo la calibración de un termómetro de vidrio de inmersión total a temperaturas superiores a 550°C. Para ello, en la figura 8.1. se ha representado un termómetro de Cuarzo-Galio introducido en un horno eléctrico regulado a una temperatura aproximada a 700°C. Simultáneamente, las indicaciones de un conjunto de termocuplas convenientemente ubicadas permitirán determinar la temperatura a que está expuesto el bulbo (termocuplas  $\tau_1$  y  $\tau_2$  y la distribución de temperatura a lo largo de su columna (termocuplas  $\tau_3$ ,  $\tau_4$  y  $\tau_5$  y termómetro de columna). Teniendo en cuenta la expresión (28) y considerando que :

$$\frac{t_{\tau_1} + t_{\tau_2}}{2} = 703,7^\circ\text{C}$$

se tendrá que :

$$C_e = 703,7 - 673,5 - C_c$$

en donde :

$$C_c = C_{\tau_2\tau_3} + C_{\tau_3\tau_4} + C_{\tau_4\tau_5} + C_{tc}$$

$C_{\tau_2\tau_3}$  es la corrección que habrá que aplicar a la longitud  $L_{23}$  de la columna de Hg del termómetro expresado en °C comprendida entre las juntas calientes de las termocupas  $\tau_2$  y  $\tau_3$ . El promedio de las indicaciones de estas últimas dará como resultado la temperatura media correspondiente a  $L_{23}$ . De este modo :

$$C_{\tau_2\tau_3} = L_{23} \delta_{23} \left( \frac{t_{\tau_1} + t_{\tau_2}}{2} - \frac{t_{\tau_2} + t_{\tau_3}}{2} \right)$$

y en forma similar :

$$C_{\tau_3\tau_4} = L_{34} \delta_{34} \left( \frac{t_{\tau_1} + t_{\tau_2}}{2} - \frac{t_{\tau_3} + t_{\tau_4}}{2} \right)$$

$$C_{\tau_4\tau_5} = L_{45} \delta_{45} \left( \frac{t_{\tau_1} + t_{\tau_2}}{2} - \frac{t_{\tau_4} + t_{\tau_5}}{2} \right)$$

y :

$$C_{tc} = L_{tc} \delta_{tc} \left( \frac{t_{\tau_1} + t_{\tau_2}}{2} - t_{tc} \right)$$

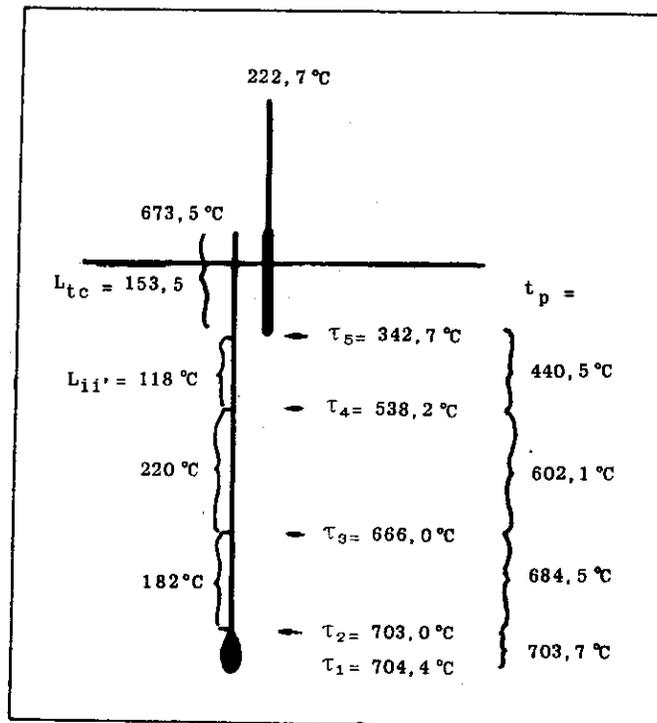


Figura 8-1

De los datos de la figura 8.1. y haciendo  $\delta_{23} = \delta_{34} = \delta_{45} = \delta_{tc} = 10 \cdot 10^{-5}$   
(ver apartado 5.4.2.) se tendrá que :

$$C_{\tau_2\tau_3} = 182 \cdot 10 \cdot 10^{-5} (703,7 - 684,5) = + 0,3^\circ\text{C}$$

$$C_{\tau_3\tau_4} = 220 \cdot 10 \cdot 10^{-5} (703,7 - 602,1) = + 2,2^\circ\text{C}$$

$$C_{\tau_4\tau_5} = 118 \cdot 10 \cdot 10^{-5} (703,7 - 440,5) = + 3,1^\circ\text{C}$$

$$C_{tc} = 153,5 \cdot 10 \cdot 10^{-5} (703,7 - 222,7) = + 7,4^\circ\text{C}$$

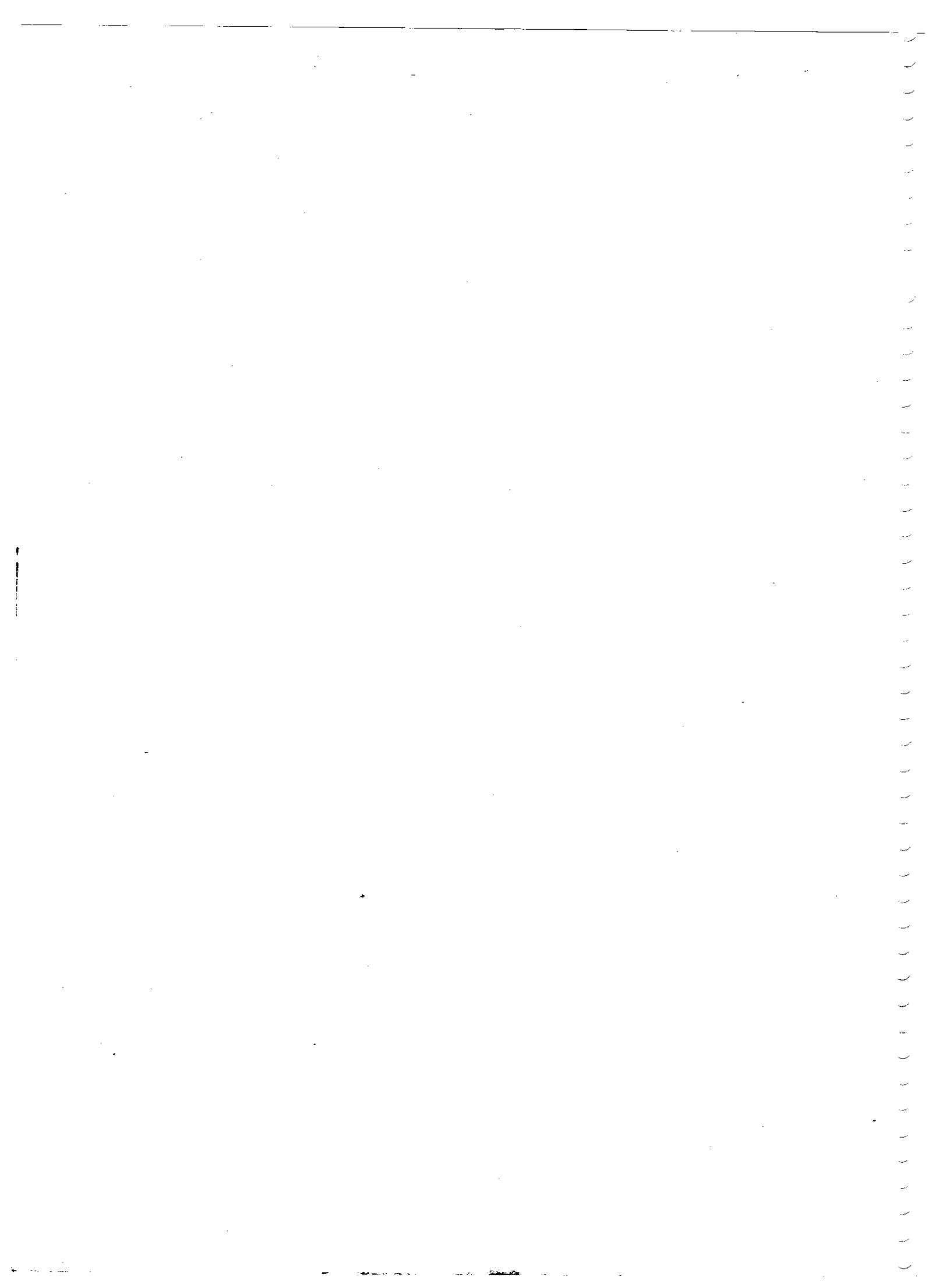
Por lo tanto :

$$C_c = + 13,0^\circ\text{C}$$

Teniendo presente, ahora, la expresión (28), la corrección de la escala será :

$$C_e = 703,7 - 673,5 - 13 = + 17,2^\circ\text{C}$$

Esto significa que cuando el termómetro indica una temperatura de  $686,5^\circ\text{C}$ , la temperatura a la que está expuesto el bulbo del mismo es de  $703,7^\circ\text{C}$ .



## 9. Calibración de un termómetro patrón de vidrio

En el capítulo 1 hemos hecho mención de los instrumentos utilizados para definir a la I. P. T. S. (68). Se los designa con el nombre genérico de patrones primarios y por su configuración constituyen, en general, instrumentos delicados, que desvirtúan sus valores ante cualquier uso no adecuado. Como una consecuencia de esto último, en la práctica es conveniente el uso de los denominados patrones secundarios, instrumentos que pueden ser de características similares o bien diferentes a las de los patrones primarios pero que, en definitiva, son calibrados frente a estos últimos. El termómetro de vidrio constituye uno de los patrones secundarios más empleados. Calibrado frente a una resistencia de platino, es utilizado principalmente en el control de otros termómetros de vidrio en la forma que ya hemos mencionado en capítulos anteriores.

La elección de un termómetro de vidrio, que será calibrado y posteriormente utilizado como un patrón secundario, estará supeditada a una serie de requisitos que dependerán fuertemente de los siguientes factores :

- a) El tipo de vidrio usado en la construcción del termómetro.
- b) La calidad del tratamiento térmico a que ha sido sometido el vidrio con el fin de asegurar su estabilidad.
- c) Adecuada construcción.
- d) La calidad de las marcas y su distribución sobre la escala.

Además, para verificar la influencia de la depresión temporal o del aumento secular sobre sus indicaciones, será necesario que la escala incluya la graduación correspondiente al 0°C o bien, si el rango cubierto por la misma no lo permite, una escala auxiliar que contenga a la mencionada temperatura de referencia.

La graduación de la escala será función del rango de temperatura dentro del cual el termómetro será utilizado, tal como puede apreciarse en la tabla 9.3

Tabla 9. 1.

Rango de la escala (°C)	Graduación de la escala (°C)
-200 a - 58	0,5
- 58 a - 5	de 0,05 a 0,2
- 5 a +110	de 0,01 a 0,1
+110 a +210	de 0,1 a 0,2
+210 a +410	0,2
+410 < + t	0,5

Por razones de precisión y exactitud, es aconsejable que los termómetros de vidrio que empleen como líquidos termométricos, líquidos orgánicos, sean utilizados como termómetros patrones, fuera del rango de temperaturas cubierto por los termómetros de Hg o de Hg-Talio.

El termómetro a ser calibrado será introducido dentro de un baño de comparación, conjuntamente con una o dos resistencias de platino patrones. La medición de estas últimas podrá ser efectuada mediante la utilización de potenciómetros de precisión, puentes de Wheatstone, de Thompson o bien del tipo inductivo. El lector interesado en las técnicas de medición de resistencias de platino, podrá recurrir, entre otros, a [29],[30],[31],[32] y [33]. La calibración se llevará a cabo realizando observaciones en cada una de las divisiones principales de la escala del termómetro. Después de cada observación, se determinará inmediatamente el valor de  $C_0$ . Ello permitirá presentar la tabla de calibración de un termómetro patrón en función de los valores de  $C_T$ , valores que como hemos visto en el apartado 6.1., son prácticamente independientes de la influencia del aumento secular y de la depresión temporal del cero (ver apartado 5.1.).

Tres observadores, A, B y C, serán afectados a la realización de la calibración. Así, mientras A y C leen las indicaciones de los termómetros de vidrio y de las resistencias de platino respectivamente, B registrará los valores correspondientes en una planilla adecuada. Inmediatamente después, una nueva observación a la misma temperatura será efectuada, pero esta vez con B y C leyendo las indicaciones de los termómetros de vidrio y resistencias de platino respectivamente, y A tomando nota de las mismas. Los observadores A y C comenzarán leyendo las indicaciones de izquierda a derecha y luego de derecha a izquierda. Los observadores B y C lo harán, en cambio, primero de derecha a izquierda y luego de izquierda a derecha. La figura 9.1. muestra, esquemáticamente, la forma en que los observadores procederán, para el caso de la calibración de dos termómetros de vidrio  $E_1$  y  $E_2$  frente a dos resistencias de platino patrones  $R_1$  y  $R_2$ .

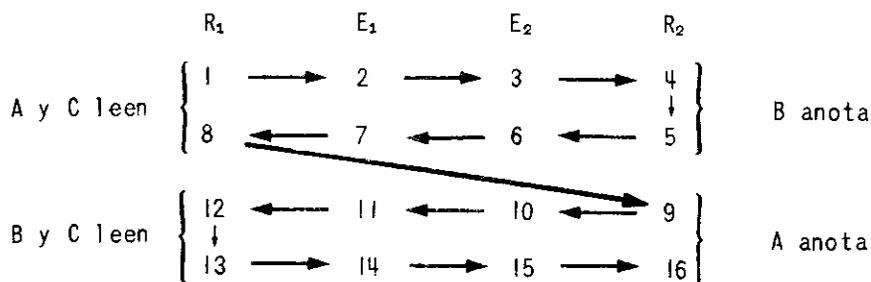


Figura 9-1

Un ejemplo numérico hipotético en la determinación de los valores de  $C_r$  correspondientes a dos termómetros de vidrio graduados en intervalos de temperatura de  $0,01^\circ\text{C}$  y para una temperatura de  $30^\circ\text{C}$  aclarará estos conceptos.

Comparación de las indicaciones

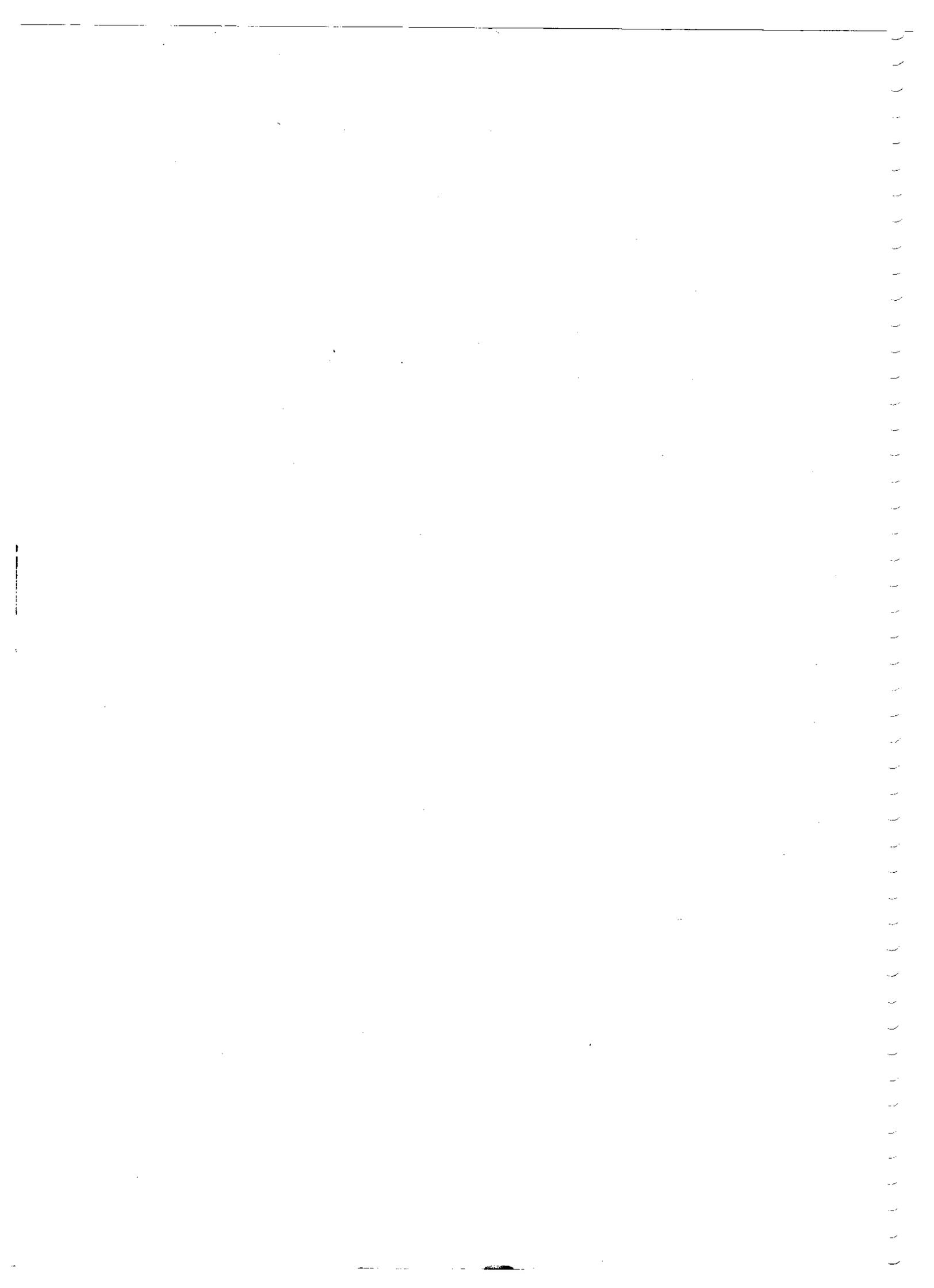
	$R_1$	$E_1$	$E_2$	$R_2$
Observadores A y C leen de izquierda a derecha	30,015	30,018	30,110	30,014
de derecha a izquierda	30,017	30,019	30,111	30,014
Observadores B y C leen de derecha a izquierda	30,019	30,022	30,113	30,016
de izquierda a derecha	<u>30,019</u>	<u>30,023</u>	<u>30,114</u>	<u>30,018</u>
Promedio de las indicaciones	30,018	30,020	30,112	30,016

Lectura en el punto de hielo de los termómetros de vidrio después de la comparación

Observador A	-0,01	+0,02
Observador B	-0,014	+0,02
Promedio	-0,012	+0,02
$C_0$	+0,012	-0,02

Cálculo de las correcciones  $C_r$  de  $E_1$  y  $E_2$

Promedio de las indicaciones		30,020	30,112	
$C_0$		+0,012	-0,02	
Corrección por columna emergente		-	-	
Temperatura indicada por $R_1$ y $R_2$	30,018			30,016
Promedio de $R_1$ y $R_2$			30,017	
Corrección de la escala $C_e$ de $E_1$ y $E_2$		-0,003	-0,095	
Corrección reducida : $C_r = C_e - C_0$		-0,015	-0,075	



## 10. Influencia de las dimensiones del bulbo y del diámetro del agujero del tubo capilar sobre el comportamiento de un termómetro de vidrio

En párrafos anteriores ya se ha mencionado en detalle los distintos factores que gobiernan la precisión y exactitud de un termómetro de vidrio. Sin embargo, nada se ha expresado acerca de las dimensiones óptimas que deberán poseer el bulbo y el diámetro de la luz del tubo capilar y de qué manera estos últimos influyen sobre el comportamiento general de estos termómetros.

Una primera hipótesis conduciría a suponer que un aumento de la longitud del °C de la escala del termómetro traería aparejado, como consecuencia, un aumento en la exactitud de la medida, condición que podría obtenerse reduciendo al máximo el diámetro de la luz del capilar. La experiencia muestra, sin embargo, que la longitud del grado tiene un límite práctico más allá del cual la combinación de fuerzas capilares y de la fuerza restauradora de las paredes del bulbo, darán origen a un movimiento errático o a saltos del menisco de la columna de Hg, que se traducirá en una disminución no sólo de la exactitud sino también de la precisión de la medida. En algunos casos, estos saltos pueden producir variaciones comprendidas entre 0,005°C y 0,01°C, es decir, del orden de la menor división de la escala de un termómetro de alta precisión.

Hall y Leaver [19] realizaron un estudio bastante completo de los errores en las indicaciones de termómetros de alta precisión introducidos por el movimiento errático del menisco de la columna de Hg y comprobaron que los efectos de las fuerzas capilares pueden manifestarse bajo tres formas posibles. Ellas son :

- 1) Los saltos del menisco de la columna de Hg.
- 2) Cambios en la indicación de la lectura del termómetro cuando éste es sometido a alguna vibración.
- 3) Diferencia entre las lecturas del termómetro para una misma temperatura verificadas variando la temperatura del medio dentro del cual está sumergido, primero en forma ascendente y luego descendente.

Estos efectos serán reducidos al máximo si se verifica que la relación :

$$\frac{\beta_e}{d} < 15 \quad (39)$$

en donde :

- $\beta_e$  = es el coeficiente de presión externa expresado en °C/mm de Hg  
 $d$  = es el diámetro de la luz del capilar expresado en mm y cuyo valor mínimo no debe ser inferior a 60  $\mu$ m.

Bajo estas condiciones dimensionales, los saltos del menisco de la columna de Hg no excederán de 0,002°C.

La figura 10.1., reproducida del trabajo de Hall y Leaver, permitirá deducir las dimensiones del bulbo que satisfacen la condición (39) para diferentes diámetros de la luz del tubo capilar. La longitud del bulbo se presenta como fracción o múltiplo de la longitud de un grado Celsius de la escala del termómetro.

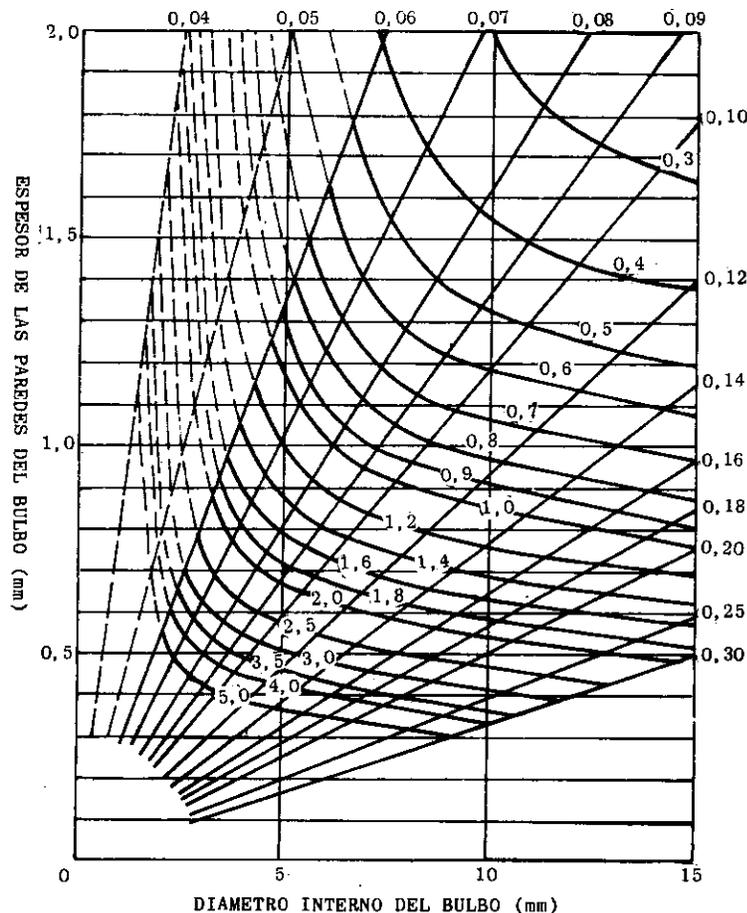


Figura 10-1

Las líneas radiales representan el diámetro de la luz del tubo capilar en mm (mínimo recomendado: 60  $\mu$ m).

Las líneas curvas representan la longitud del bulbo como fracción o múltiplo de la longitud de un grado celsius de la escala.

Un ejemplo aclarará el uso de la figura 10.1. : Para un diámetro de la luz del tubo capilar de 0,10 mm y un diámetro interior del bulbo de 7 mm, las paredes de este último tendrán que ser de 0,85 mm de espesor y su largo 1,2 veces la longitud de un grado Celsius sobre su escala.

## 11. Recomendaciones para el uso correcto de termómetros de vidrio

El termómetro de vidrio es, sin lugar a dudas, el sensor de temperaturas más conocido y, como consecuencia de ello, también el de uso más generalizado. Esta familiaridad lleva, sin embargo, a que muchos usuarios del termómetro de vidrio hagan un uso incorrecto del mismo, al no tomar ciertas precauciones que conducen generalmente a la realización de medidas erróneas. Por ello, ciertas reglas se presentan en lo que sigue y a las que el termometrista deberá ajustarse si desea que las indicaciones de su termómetro durante una medición puedan ser consideradas como fidedignas. Ellas son :

- 1) La temperatura verdadera será igual a la temperatura indicada por el termómetro más el correspondiente valor de la corrección de la escala, tomada esta última con su signo (ver -en capítulo 5- la expresión (3)). Estas correcciones son suministradas en la tabla de calibración del termómetro.
- 2) Si las condiciones en temperatura del medio que rodea al termómetro durante su uso son distintas a las condiciones existentes en el momento de su calibración, habrá que aplicar sobre sus indicaciones correcciones por columna (ver apartado 5.4.).
- 3) Las correcciones de la escala que se suministran en la tabla de calibración y que se aplicarán sobre las temperaturas indicadas por el termómetro, sólo serán válidas si el mismo es utilizado en posición vertical, bajo una presión de una atmósfera y el bulbo puede dilatarse o contraerse libremente. Si la posición del termómetro durante su uso es horizontal, sus indicaciones estarán afectadas por un error, que puede llegar a ser de hasta  $0,05^{\circ}\text{C}$ .
- 4) En termómetros cuyas escalas están graduadas en intervalos de temperatura menores a  $1^{\circ}\text{C}$  y en donde el valor máximo sobre las mismas no exceden de  $100^{\circ}\text{C}$ , las correcciones de la tabla de calibración sólo serán válidas si el termómetro, antes de ser utilizado, ha permanecido a una temperatura ambiente comprendida entre  $20^{\circ}\text{C}$  y  $25^{\circ}\text{C}$  al menos durante tres días (ver apartado 6.2.). Si bajo estas

condiciones, el valor correspondiente al punto fijo del hielo ( $0^{\circ}\text{C}$ ) es superior o inferior al correspondiente valor de la tabla de calibración, todas las restantes indicaciones serán superiores o inferiores en la misma cantidad.

- 5) En termómetros cuyas escalas están graduadas en intervalos de temperatura menores a  $1^{\circ}\text{C}$  y en donde el valor máximo sobre las mismas excede de  $110^{\circ}\text{C}$ , las correcciones de la tabla de calibración sólo serán válidas si el termómetro, antes de ser utilizado, ha sido expuesto a la máxima temperatura que indica su escala, al menos durante 5 minutos, y luego dejado enfriar a temperatura ambiente en contacto directo con el aire. Si bajo estas condiciones el valor correspondiente al punto fijo del hielo ( $0^{\circ}\text{C}$ ) es superior o inferior al correspondiente valor sobre la tabla de calibración, todas las restantes indicaciones serán superiores o inferiores en la misma cantidad.

## 12. Puntos fijos, baños de comparación y hornos eléctricos

En este capítulo se procura bosquejar, sin entrar en mayores detalles, cómo establecer los distintos puntos fijos, la construcción y diseño de baños de comparación y hornos eléctricos empleados en la calibración de termómetros de vidrio. Mucha bibliografía existe sobre este tema y el lector interesado podrá consultar, entre otros, a [4], [6], [10], [34], [35], [36], [37] y [38].

### 12.1. PUNTO FIJO DEL HIELO

El punto fijo del hielo se define como la temperatura de equilibrio entre las fases sólida y líquida, saturada con aire, del agua químicamente pura, bajo una presión de una atmósfera. Esta temperatura puede lograrse fácilmente con una exactitud mayor que  $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ , pero tomando ciertas precauciones la misma puede ser obtenida con una exactitud no menor de  $\pm 0,001^{\circ}\text{C}$ . Para establecer este punto fijo, se introduce dentro de un recipiente de Dewar una cantidad de hielo puro, finamente dividido, y se apisona hasta formar una masa compacta. En un segundo paso, el hielo compactado será humedecido con agua pura que previamente ha sido agitada en un recipiente adecuado para permitir su saturación con aire. Esta última operación será conveniente realizarla con agua que se encuentre a una temperatura aproximadamente igual a  $0^{\circ}\text{C}$ , ya que la solubilidad del aire en el agua aumenta cuando disminuye la temperatura. La cantidad de agua introducida en el recipiente de Dewar será la suficiente para eliminar el aire contenido entre las partículas de hielo, pero al mismo tiempo insuficiente para formar una capa de líquido con el fin de evitar que el hielo flote dentro del recipiente. Esto último podrá lograrse introduciendo a unos dos o tres centímetros por debajo de la superficie del hielo, un tubo de vidrio, conectado a un tubo de goma o de plástico, que permitirá succionar el agua sobrante (figura 12.1.). Debido al hecho de que el hielo se transforma en agua con el correr del tiempo, la operación de succión deberá repetirse periódicamente, reponiendo, asimismo, el hielo fundido. El agua a utilizarse en el establecimiento del punto fijo del hielo deberá ser desionizada y destilada. Se recomienda que el termómetro sea cuidadosamente lavado antes de introducirlo en el recipiente, para evitar la contaminación del agua.

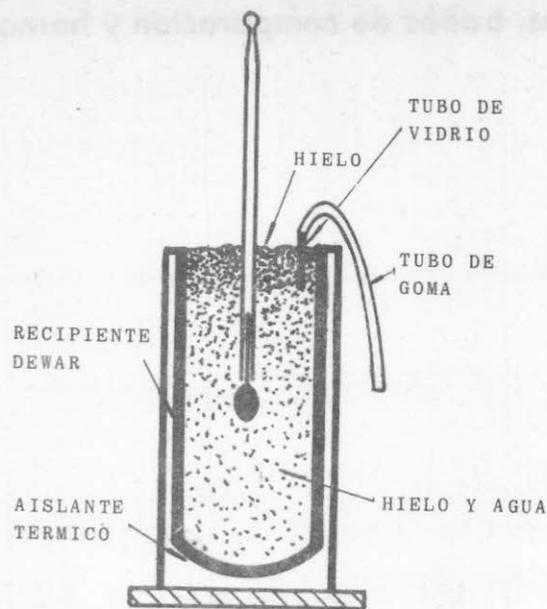


Figura 12-1

## 12.2. PUNTO FIJO DE EBULLICION DEL AGUA

El punto de ebullición del agua que se define como la temperatura de equilibrio entre el agua pura y su vapor bajo una presión de una atmósfera, puede ser obtenido en un dispositivo denominado hipsómetro (figura 12. 2.).

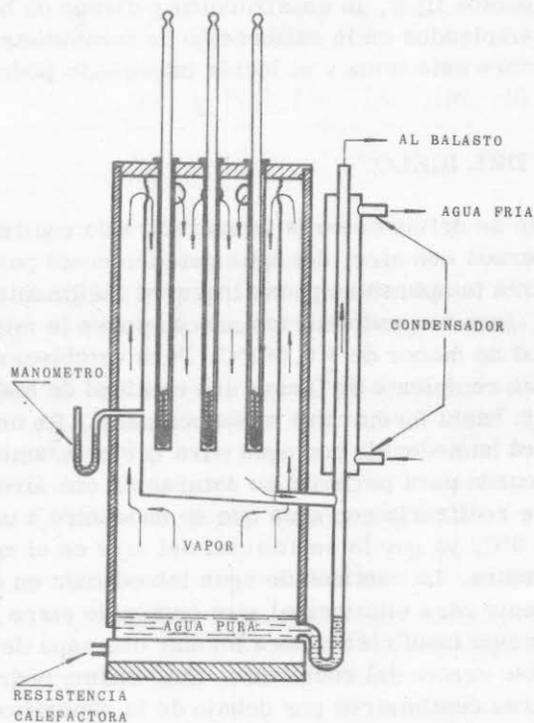


Figura 12-2

Este último consiste básicamente en dos cilindros metálicos concéntricos construidos con algún material inoxidable, ambos con sus extremos inferiores cerrados. En el cilindro exterior, que se encuentra térmicamente aislado, una cantidad determinada de agua ebulle violentamente en contacto adecuado con una resistencia cale-

factora. El vapor de agua, producto de esta ebullición, pasará al cilindro interior (en donde serán introducidos los termómetros de vidrio) a través de aberturas situadas en su extremo superior. Finalmente, el vapor de agua fluirá por un condensador en donde condensará, volviendo el líquido al cilindro exterior, cerrando con ello el circuito de circulación.

Es de hacer notar que en este dispositivo, el cilindro interior está incluido dentro del hipsómetro para evitar las pérdidas o ganancias de calor por radiación de los bulbos de los termómetros debido a las diferencias de temperatura que podrían existir entre estos últimos y las paredes del cilindro exterior y la resistencia calefactora respectivamente.

Teniendo en cuenta que la temperatura de ebullición del agua depende, en forma importante, de la presión atmosférica, ésta deberá ser cuidadosamente medida, tratando de realizar las observaciones de las indicaciones de los termómetros en el menor tiempo posible, para evitar que cambios en la presión atmosférica afecten el valor de la temperatura de ebullición del agua. Un método alternativo será conectar el hipsómetro a un balasto de 400 litros o más de capacidad. De este modo, el volumen del sistema será grande y prácticamente insensible a los cambios de la presión atmosférica. Un barómetro de tipo Fortin, con una exactitud en las medidas de presión no menor de 0,05 mm de Hg, permitirá determinar la temperatura de ebullición del agua con una exactitud de  $\pm 0,002^{\circ}\text{C}$ .

### 12.3. BAÑOS DE COMPARACION

#### 12.3.1. Baño para bajas temperaturas

La figura 12.3. muestra un simple baño de comparación para ser utilizado en la calibración de termómetros de vidrio en el rango de  $-80^{\circ}\text{C}$  a  $0^{\circ}\text{C}$ .

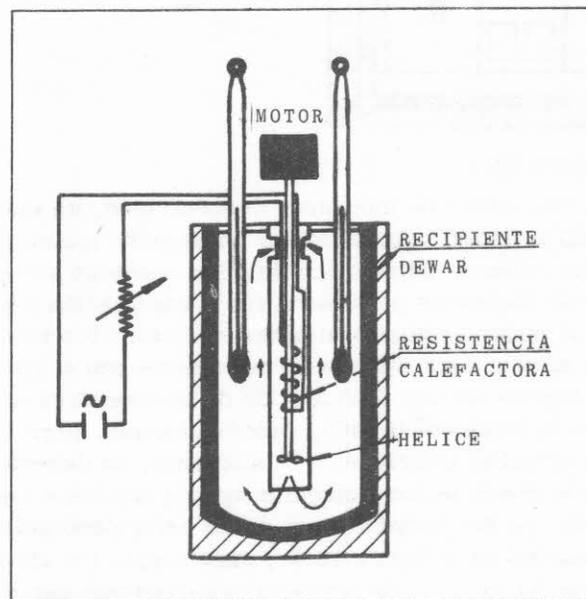


Figura 12-3

El mismo consiste en un recipiente de Dewar colocado dentro de un recipiente metálico y térmicamente aislado. Concéntrico con aquél, se introduce un cilindro metálico cuyo extremo superior posee una serie de aberturas, mientras su extremo inferior es abierto con el fin de facilitar la circulación del líquido del baño de una zona a otra. Se agrega, además, dentro del cilindro metálico, una pequeña resis -

tencia calefactora y un agitador, impulsado por un motor eléctrico de unas 650 rpm cuyo funcionamiento permitirá alcanzar una distribución uniforme de temperatura en el seno de la masa del líquido.

El enfriamiento del baño se realizará introduciéndole pequeñas cantidades de hielo seco ( $\text{CO}_2$ ), en forma lenta, mientras el ascenso de temperatura se podrá controlar mediante un regulador de tensión conectado a la resistencia calefactora. Los líquidos que se emplean generalmente son acetona o alcohol.

### 12.3.2. Baños para temperaturas comprendidas entre $0^\circ\text{C}$ y $250^\circ\text{C}$

El baño que se muestra en la figura 12.4. es empleado en la comparación de termómetros en el rango de temperaturas comprendido entre  $0^\circ\text{C}$  y  $250^\circ\text{C}$ .

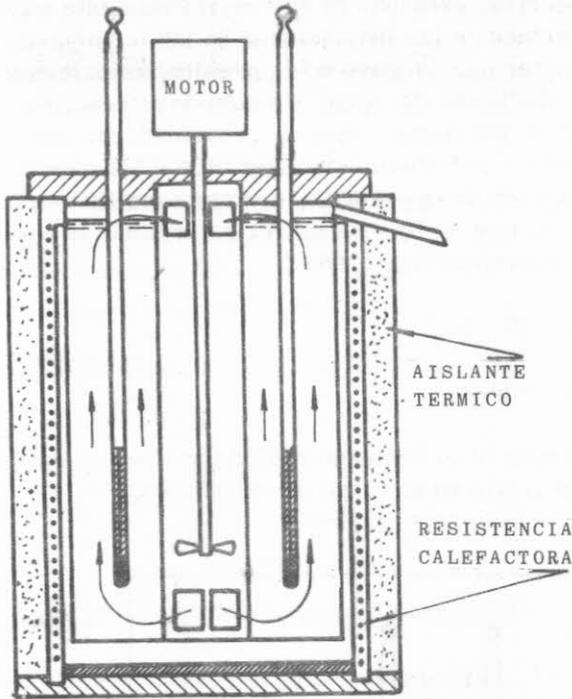


Figura 12.4.

Está constituido por dos cilindros metálicos concéntricos, un sistema de resistencias calefactoras y un agitador impulsado por un pequeño motor eléctrico de muy altas revoluciones por minuto. El cilindro interior posee en sus extremos superior e inferior una serie de aberturas para permitir la circulación del líquido del baño, de una zona a otra, al poner en funcionamiento el motor eléctrico del agitador. El cilindro exterior, a su vez, está aislado térmicamente con el fin de disminuir las pérdidas de calor y lograr así una distribución de temperatura lo más uniforme posible en el seno de la masa del líquido. Adicionalmente, para la comparación de termómetros a temperaturas inferiores a la ambiente, se deberá agregar al sistema una serpentina por donde se hará circular agua o alcohol a temperatura adecuada. Es de hacer notar que los termómetros deben estar protegidos por una "guarda" (que no se representa en la figura 12.4.) para anular los efectos de la radiación que se originan en las diferencias de temperatura existente entre las diferentes partes del baño y que podrían afectar sus indicaciones. Un regulador de tensión conectado a la resistencia calefactora, permitirá el control del ascenso de temperatura.

El tipo de líquido que será empleado en el baño dependerá del rango de temperatura requerido para la comparación de los termómetros, tal como se puede apreciar en el siguiente cuadro :

Rango (°C)	Tipo de líquido
0°C a 100°C	agua
90°C a 250°C	aceite

El aceite debe ser elegido de tal modo que no sea demasiado viscoso y que la temperatura correspondiente a su punto de inflamación exceda holgadamente los 250°C. Se recomiendan, en general, los aceites de tipo mineral o de siliconas.

### 12.3.3. Baño de sales

Este baño es utilizado para la comparación de termómetros de vidrio en el rango de temperaturas comprendido entre 200°C y 550°C. Su diseño es muy similar al de la figura 12.4., aunque en este caso se deberá adicionar al mismo una serie de tubos metálicos cerrados en sus extremos inferiores y en donde serán introducidos los termómetros. Esto último es aconsejable pues evitará el contacto directo con las sales, protegiéndolos de su acción corrosiva. Por este motivo se emplea acero inoxidable en la construcción de los baños de sales.

El tipo de sales utilizado generalmente en estos baños es una mezcla de 55,2% en peso de  $KNO_3$  y 44,8% en peso de  $NaNO_2$ . A los efectos de prevenir el riesgo de explosiones, debe evitarse la penetración de humedad en este tipo de baños, particularmente cuando funcionen a temperaturas elevadas.

### 12.4. HORNOS ELECTRICOS

La figura 12.5. muestra un tipo de horno eléctrico empleado en la calibración de termómetros de vidrio a temperaturas superiores a 550°C.

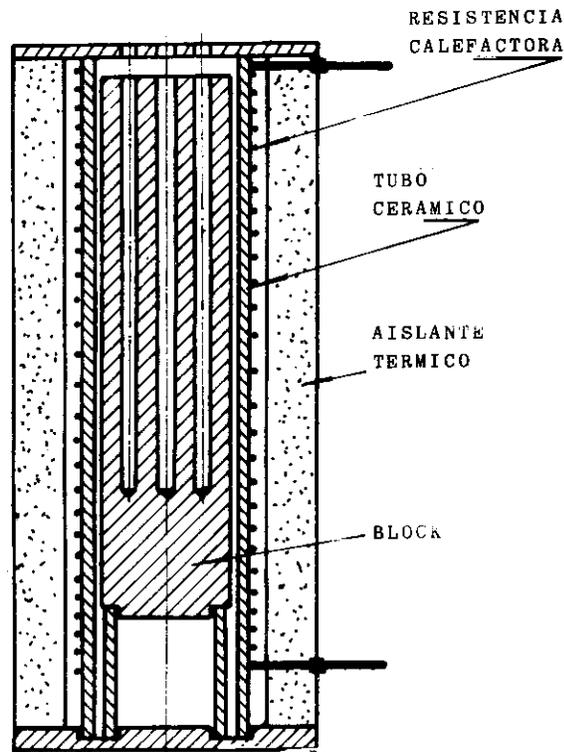


Figura 12.5.

Consiste esencialmente en un tubo cerámico de 12 cm de diámetro y de 50 cm a 60 cm de longitud, rodeado por una resistencia calefactora de Cromel-Nickel e introducido en forma concéntrica dentro de un cilindro metálico de mayor diámetro. En el espacio intermedio, situado entre ambos, se coloca un material térmicamen

te aislante. Bajo estas condiciones, el horno puede ser utilizado hasta una temperatura de 1 100 °C.

Una desventaja que presentan en la práctica los hornos eléctricos, frente a los baños de comparación, es la considerable pérdida de calor que existe durante su funcionamiento y que se traduce en la existencia de un fuerte gradiente de temperatura en el sentido longitudinal del mismo. Este efecto puede ser minimizado si se dispone de resistencias calefactoras suplementarias situadas sobre ambos extremos del tubo cerámico.

La distribución de temperatura existente en la zona central del horno podrá ser mejorada notablemente con el empleo de un homogeneizador, que consiste en una pieza cilíndrica de acero inoxidable o de níquel, de 40 cm de longitud y 10 cm de diámetro como mínimo, con perforaciones longitudinales de 30 cm de largo en las que se introducen los termómetros a ser comparados. Estas perforaciones están distribuidas en el homogeneizador, sobre una circunferencia de diámetro igual a la mitad del diámetro de la pieza.

# Apéndice

t °C	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100
-100	0.022	0.013	0.003	-0.006	-0.013	-0.013	-0.005	0.007	0.012		
-	0.000	0.006	0.012	0.018	0.024	0.029	0.032	0.034	0.033	0.029	0.022
t <sub>68</sub> °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0.000	-0.004	-0.007	-0.009	-0.010	-0.010	-0.010	-0.008	-0.006	-0.003	0.000
100	0.000	0.004	0.007	0.012	0.016	0.020	0.025	0.029	0.034	0.038	0.043
200	0.043	0.047	0.051	0.054	0.058	0.061	0.064	0.061	0.069	0.071	0.073
300	0.073	0.074	0.075	0.076	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077	0.076	0.076
400	0.076	0.075	0.075	0.075	0.074	0.074	0.074	0.075	0.076	0.077	0.079
500	0.079	0.082	0.085	0.089	0.094	0.100	0.108	0.116	0.126	0.137	0.150
600	0.150	0.165	0.182	0.200	0.23	0.25	0.28	0.31	0.34	0.36	0.39
700	0.39	0.42	0.45	0.47	0.50	0.53	0.56	0.58	0.61	0.64	0.67
800	0.67	0.70	0.72	0.75	0.78	0.81	0.84	0.87	0.89	0.92	0.95
900	0.95	0.98	1.01	1.04	1.07	1.10	1.12	1.15	1.18	1.24	
1 000	1.24	1.27	1.30	1.33	1.36	1.39	1.42	1.44			
t <sub>68</sub> °C	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000
1 000		1.5	1.7	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2
2 000	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2	4.5	4.8	5.0	5.3	5.6	5.9
3 000	5.9	6.2	6.5	6.9	7.2	7.5	7.9	8.2	8.6	9.0	9.3

Diferencias aproximadas ( $t_{68} - t_{48}$ ), en kelvin, entre los valores de temperaturas dados por la I. P. T. S. 68 y la I. P. T. S. 48.  
 Reproducido de I. P. T. S. (68) - Metalurgia N° 2 - Pág. 44 - Abril 1969.

Tabla de conversión: grados Celcius a grados Fahrenheit

°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F		
-200	-328	-346	-364	-382	-400	-418	-436	-454	F			
-100	-148	-166	-184	-202	-220	-238	-256	-274	-292	-310		
0	+32	+14	-4	-22	-40	-58	-76	-94	-112	-130		
0	32	50	68	86	104	122	140	158	176	194		
100	212	230	248	266	284	302	320	338	356	374	°C	°F
200	392	410	428	446	464	482	500	518	536	554	1	1.8
300	572	590	608	626	644	662	680	698	716	734	2	3.6
400	752	770	788	806	824	842	860	878	896	914	3	5.4
500	932	950	968	986	1004	1022	1040	1058	1076	1094	4	7.2
600	1112	1130	1148	1166	1184	1202	1220	1238	1256	1274	5	9.0
700	1292	1310	1328	1346	1364	1382	1400	1418	1436	1454	6	10.8
800	1472	1490	1508	1526	1544	1562	1580	1598	1616	1634	7	12.6
900	1652	1670	1688	1706	1724	1742	1760	1778	1796	1814	8	14.4
1000	1832	1850	1868	1886	1904	1922	1940	1958	1976	1994	9	16.2
1100	2012	2030	2048	2066	2084	2102	2120	2138	2156	2174	10	18.0
1200	2192	2210	2228	2246	2264	2282	2300	2318	2336	2354		
1300	2372	2390	2408	2426	2444	2462	2480	2498	2516	2534		
1400	2552	2570	2588	2606	2624	2642	2660	2678	2696	2714		
1500	2732	2750	2768	2786	2804	2822	2840	2858	2876	2894		
1600	2912	2930	2948	2966	2984	3002	3020	3038	3056	3074	°F	°C
1700	3092	3110	3128	3146	3164	3182	3200	3218	3236	3254	1	0.56
1800	3272	3290	3308	3326	3344	3362	3380	3398	3416	3434	2	1.11
1900	3452	3470	3488	3506	3524	3542	3560	3578	3596	3614	3	1.67
2000	3632	3650	3668	3686	3704	3722	3740	3758	3776	3794	4	2.22
2100	3812	3830	3848	3866	3884	3902	3920	3938	3956	3974	5	2.78
2200	3992	4010	4028	4046	4064	4082	4100	4118	4136	4154	6	3.33
2300	4172	4190	4208	4226	4244	4262	4280	4298	4316	4334	7	3.89
2400	4352	4370	4388	4406	4424	4442	4460	4478	4496	4514	8	4.44
2500	4532	4550	4568	4586	4604	4622	4640	4658	4676	4694	9	5.00
2600	4712	4730	4748	4766	4784	4802	4820	4838	4856	4874	10	5.56
2700	4892	4910	4928	4946	4964	4982	5000	5018	5036	5054	11	6.11
2800	5072	5090	5108	5126	5144	5162	5180	5198	5216	5234	12	6.67
2900	5252	5270	5288	5306	5324	5342	5360	5378	5396	5414	13	7.22
3000	5432	5450	5468	5486	5504	5522	5540	5558	5576	5594	14	7.78
3100	5612	5630	5648	5666	5684	5702	5720	5738	5756	5774	15	8.33
3200	5792	5810	5828	5846	5864	5882	5900	5918	5936	5954	16	8.89
3300	5972	5990	6008	6026	6044	6062	6080	6098	6116	6134	17	9.44
3400	6152	6170	6188	6206	6224	6242	6260	6278	6296	6314	18	10.00
3500	6332	6350	6368	6386	6404	6422	6440	6458	6476	6494		
3600	6512	6530	6548	6566	6584	6602	6620	6638	6656	6674		
3700	6692	6710	6728	6746	6764	6782	6800	6818	6836	6854		
3800	6872	6890	6908	6926	6944	6962	6980	6998	7016	7034		
3900	7052	7070	7088	7106	7124	7142	7160	7178	7196	7214		
°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90		

Ejemplos:

$$724 \text{ °C} = 1\ 328 \text{ °F} + 7,2 \text{ °F} = 1\ 335,2 \text{ °F}$$

$$2\ 670 \text{ °F} = 1\ 460 \text{ °C} + 5,56 \text{ °C} = 1\ 465,56 \text{ °C}$$

Tabla de conversión: grados Fahrenheit a grados Celcius

°F	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
-400	-240.0	-245.5	-251.1	-256.6	-262.2	-267.7	C	C	C	C		
-300	-184.4	-190.0	-195.5	-201.1	-206.6	-212.2	-217.7	-223.3	-228.8	-234.4		
-200	-128.8	-134.4	-140.0	-145.5	-151.1	-156.6	-162.2	-167.7	-173.3	-178.8		
-100	-73.3	-78.8	-84.4	-90.0	-95.5	-101.1	-106.6	-112.2	-117.7	-123.3		
0	-17.7	-23.3	-28.8	-34.4	-40.0	-45.5	-51.1	-56.6	-62.2	-67.7		
0	-17.7	-12.2	-6.6	-1.1	+4.4	+10.0	+15.5	+21.1	+26.6	+32.2		
100	37.7	43.3	48.8	54.4	60.0	65.5	71.1	76.6	82.2	87.7		
200	93.3	98.8	104.4	110.0	115.5	121.1	126.6	132.2	137.7	143.3		
300	148.8	154.4	160.0	165.5	171.1	176.6	182.2	187.7	193.3	198.8		
400	204.4	210.0	215.5	221.1	226.6	232.2	237.7	243.3	248.8	254.4		
500	260.0	265.5	271.1	276.6	282.2	287.7	293.3	298.8	304.4	310.0		
600	315.5	321.1	326.6	332.2	337.7	343.3	348.8	354.4	360.0	365.5		
700	371.1	376.6	382.2	387.7	393.3	398.8	404.4	410.0	415.5	421.1		
800	426.6	432.2	437.7	443.3	448.8	454.4	460.0	465.5	471.1	476.6		
900	482.2	487.7	493.3	498.8	504.4	510.0	515.5	521.1	526.6	532.2		
1000	537.7	543.3	548.8	554.4	560.0	565.5	571.1	576.6	582.2	587.7	°F	°C
1100	593.3	598.8	604.4	610.0	615.5	621.1	626.6	632.2	637.7	643.3	1	0.5
1200	648.8	654.4	660.0	665.5	671.1	676.6	682.2	687.7	693.3	698.8	2	1.1
1300	704.4	710.0	715.5	721.1	726.6	732.2	737.7	743.3	748.8	754.4	3	1.6
1400	760.0	765.5	771.1	776.6	782.2	787.7	793.3	798.8	804.4	810.0		
1500	815.5	821.1	826.6	832.2	837.7	843.3	848.8	854.4	860.0	865.5		
1600	871.1	876.6	882.2	887.7	893.3	898.8	904.4	910.0	915.5	921.1	4	2.2
1700	926.6	932.2	937.7	943.3	948.8	954.4	960.0	965.5	971.1	976.6	5	2.7
1800	982.2	987.7	993.3	998.8	1004.4	1010.0	1015.5	1021.1	1026.6	1032.2	6	3.3
1900	1037.7	1043.3	1048.8	1054.4	1060.0	1065.5	1071.1	1076.6	1082.2	1087.7	7	3.8
2000	1093.3	1098.8	1104.4	1110.0	1115.5	1121.1	1126.6	1132.2	1137.7	1143.3	8	4.4
2100	1148.8	1154.4	1160.0	1165.5	1171.1	1176.6	1182.2	1187.7	1193.3	1198.8	9	5.0
2200	1204.4	1210.0	1215.5	1221.1	1226.6	1232.2	1237.7	1243.3	1248.8	1254.4		
2300	1260.0	1265.5	1271.1	1276.6	1282.2	1287.7	1293.3	1298.8	1304.4	1310.0		
2400	1315.5	1321.1	1326.6	1332.2	1337.7	1343.3	1348.8	1354.4	1360.0	1365.5		
2500	1371.1	1376.6	1382.2	1387.7	1393.3	1398.8	1404.4	1410.0	1415.5	1421.1		
2600	1426.6	1432.2	1437.7	1443.3	1448.8	1454.4	1460.0	1465.5	1471.1	1476.6		
2700	1482.2	1487.7	1493.3	1498.8	1504.4	1510.0	1515.5	1521.1	1526.6	1532.2		
2800	1537.7	1543.3	1548.8	1554.4	1560.0	1565.5	1571.1	1576.6	1582.2	1587.7		
2900	1593.3	1598.8	1604.4	1610.0	1615.5	1621.1	1626.6	1632.2	1637.7	1643.3		
3000	1648.8	1654.4	1660.0	1665.5	1671.1	1676.6	1682.2	1687.7	1693.3	1698.8		
3100	1704.4	1710.0	1715.5	1721.1	1726.6	1732.2	1737.7	1743.3	1748.8	1754.4		
3200	1760.0	1765.5	1771.1	1776.6	1782.2	1787.7	1793.3	1798.8	1804.4	1810.0		
3300	1815.5	1821.1	1826.6	1832.2	1837.7	1843.3	1848.8	1854.4	1860.0	1865.5		
3400	1871.1	1876.6	1882.2	1887.7	1893.3	1898.8	1904.4	1910.0	1915.5	1921.1		
3500	1926.6	1932.2	1937.7	1943.3	1948.8	1954.4	1960.0	1965.5	1971.1	1976.6		
3600	1982.2	1987.7	1993.3	1998.8	2004.4	2010.0	2015.5	2021.1	2026.6	2032.2		
°F	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90		



Tabla de conversión: grados Fahrenheit a grados Celsius  
(continuación)

°F	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C		
3700	2037.7	2043.3	2048.8	2054.4	2060.0	2065.5	2071.1	2076.6	2082.2	2087.7		
3800	2093.3	2098.8	2104.4	2110.0	2115.5	2121.1	2126.6	2132.2	2137.7	2143.3		
3900	2148.8	2154.4	2160.0	2165.5	2171.1	2176.6	2182.2	2187.7	2193.3	2198.8		
4000	2204.4	2210.0	2215.5	2221.1	2226.6	2232.2	2237.7	2243.3	2248.8	2254.4		
4100	2260.0	2265.5	2271.1	2276.6	2282.2	2287.7	2293.3	2298.8	2304.4	2310.0		
4200	2315.5	2321.1	2326.6	2332.2	2337.7	2343.3	2348.8	2354.4	2360.0	2365.5		
4300	2371.1	2376.6	2382.2	2387.7	2393.3	2398.8	2404.4	2410.0	2415.5	2421.1		
4400	2426.6	2432.2	2437.7	2443.3	2448.8	2454.4	2460.0	2465.5	2471.1	2476.6		
4500	2482.2	2487.7	2493.3	2498.8	2504.4	2510.0	2515.5	2521.1	2526.6	2532.2		
4600	2537.7	2543.3	2548.8	2554.4	2560.0	2565.5	2571.1	2576.6	2582.2	2587.7		
4700	2593.3	2598.8	2604.4	2610.0	2615.5	2621.1	2626.6	2632.2	2637.7	2643.3		
4800	2648.8	2654.4	2660.0	2665.5	2671.1	2676.6	2682.2	2687.7	2693.3	2698.8		
4900	2704.4	2710.0	2715.5	2721.1	2726.6	2732.2	2737.7	2743.3	2748.8	2754.4		
5000	2760.0	2765.5	2771.1	2776.6	2782.2	2787.7	2793.3	2798.8	2804.4	2810.0	°F	°C
											1	0.5
											2	1.1
											3	1.6
											4	2.2
											5	2.7
											6	3.3
											7	3.8
											8	4.4
											9	5.0
5100	2815.5	2821.1	2826.6	2832.2	2837.7	2843.3	2848.8	2854.4	2860.0	2865.5		
5200	2871.1	2876.6	2882.2	2887.7	2893.3	2898.8	2904.4	2910.0	2915.5	2921.1		
5300	2926.6	2932.2	2937.7	2943.3	2948.8	2954.4	2960.0	2965.5	2971.1	2976.6		
5400	2982.2	2987.7	2993.3	2998.8	3004.4	3010.0	3015.5	3021.1	3026.6	3032.2		
5500	3037.7	3043.3	3048.8	3054.4	3060.0	3065.5	3071.1	3076.6	3082.2	3087.7		
5600	3093.3	3098.8	3104.4	3110.0	3115.5	3121.1	3126.6	3132.2	3137.7	3143.3		
5700	3148.8	3154.4	3160.0	3165.5	3171.1	3176.6	3182.2	3187.7	3193.3	3198.8		
5800	3204.4	3210.0	3215.5	3221.1	3226.6	3232.2	3237.7	3243.3	3248.8	3254.4		
5900	3260.0	3265.5	3271.1	3276.6	3282.2	3287.7	3293.3	3298.8	3304.4	3310.0		
6000	3315.5	3321.1	3326.6	3332.2	3337.7	3343.3	3348.8	3354.4	3360.0	3365.5		
6100	3371.1	3376.6	3382.2	3387.7	3393.3	3398.8	3404.4	3410.0	3415.5	3421.1		
6200	3426.6	3432.2	3437.7	3443.3	3448.8	3454.4	3460.0	3465.5	3471.1	3476.6		
6300	3482.2	3487.7	3493.3	3498.8	3504.4	3510.0	3515.5	3521.1	3526.6	3532.2		
6400	3537.7	3543.3	3548.8	3554.4	3560.0	3565.5	3571.1	3576.6	3582.2	3587.7		
6500	3593.3	3598.8	3604.4	3610.0	3615.5	3621.1	3626.6	3632.2	3637.7	3643.3		
6600	3648.8	3654.4	3660.0	3665.5	3671.1	3676.6	3682.2	3687.7	3693.3	3698.8		
6700	3704.4	3710.0	3715.5	3721.1	3726.6	3732.2	3737.7	3743.3	3748.8	3754.4		
6800	3760.0	3765.5	3771.1	3776.6	3782.2	3787.7	3793.3	3798.8	3804.4	3810.0		
6900	3815.5	3821.1	3826.6	3832.2	3837.7	3843.3	3848.8	3854.4	3860.0	3865.5		
7000	3871.1	3876.6	3882.2	3887.7	3893.3	3898.8	3904.4	3910.0	3915.5	3921.1		
7100	3926.6	3932.2	3937.7	3943.3	3948.8	3954.4	3960.0	3965.5	3971.1	3976.6		
7200	3982.2	3987.7	3993.3	3998.8	4004.4	4010.0	4015.5	4021.1	4026.6	4032.2		
7300	4037.7	4043.3	4048.8	4054.4	4060.0	4065.5	4071.1	4076.6	4082.2	4087.7		
7400	4093.3	4098.8	4104.4	4110.0	4115.5	4121.1	4126.6	4132.2	4137.7	4143.3		
7500	4148.8	4154.4	4160.0	4165.5	4171.1	4176.6	4182.2	4187.7	4193.3	4198.8		
7600	4204.4	4210.0	4215.5	4221.1	4226.6	4232.2	4237.7	4243.3	4248.8	4254.4		
7700	4260.0	4265.5	4271.1	4276.6	4282.2	4287.7	4293.3	4298.8	4304.4	4310.0		
7800	4315.5	4321.1	4326.6	4332.2	4337.7	4343.3	4348.8	4354.4	4360.0	4365.5		
7900	4371.1	4376.6	4382.2	4387.7	4393.3	4398.8	4404.4	4410.0	4415.5	4421.1		
°F	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90		

Ejemplo:

$$4\ 128\ ^\circ\text{F} = 2\ 271,1\ ^\circ\text{C} + 4,4\ ^\circ\text{C} = 2\ 275,5\ ^\circ\text{C}$$

## Bibliografía

- 1 - The International Practical Temperature Scale of 1968, Metrología, Vol.5, N° 2, pág. 35.
- 2 - Comité Consultatif de Thermométrie - VIIIème. session 1967 - Annexe 18.
- 3 - Hall J. A. and V. Leaver - Stabilization of Thermometers of borosilicate glass for use at high temperatures - J. Scient. Instrument - 88-178-1961.
- 4 - American Society for Testing Materials : Standard Method for Inspection Test and Standardization of Etched-Stem Liquid in Glass Thermometers - ASTM : Designation E77-64.
- 5 - P. T. B. - Prüfregeln; Flüssigkeits-Glasthermometer 14.01-67 - pág. 84.
- 6 - Hall J. A. and C. R. Barber - Notes on Applied Science N°12 - N. P. L. - 1964 - pág. 31.
- 7 - Thompson Robert - Recent Developments in Liquid -in Glass Thermometry- Temperature - Its Measurement and Control of Science and Industry - Vol. 3, parte 1, pág. 201 - 1962.
- 8 - Busse Johanna - Liquid in Glass Thermometers - Temperature, its Measurement and Control in Science and Industry - 1941, pág. 228.
- 9 - American Society for Testing Materials : Standard Specifications for A. S. T. M. Thermometers - A. S. T. M. designation : E1-64.
- 10 - Swindells James F. - Calibration of Liquid-in-Glass-Thermometer - N. B. S. Monograph 90 - 1965 .
- 11 - P. T. B. - Prüfregeln; Flüssigkeit-Glasthermometer 14.01-67- pág. 19.

- 12 - Duhrman J.G. - A note on the care of Liquid-in-Glass-Thermometers - J. Scient. Inst. and of Physics in Industry - Vol. 26, N°6 - June 1949, pág. 205.
- 13 - Waichner C.W. and Dickinson H. C. : On the Standard Scale of Temperature in the Interval 0°C to 100°C - Bull. Bur. Standards 3-663-728-1907.
- 14 - Hall J. A. : The International Temperature Scale between 0°C and 100°C - Phil. Trans. Roy. Soc. - London A229-1-48 - 1929.
- 15 - Van Dijk, Hall and Leaver : The influence of rate of cooling on the zeros of mercury in glass thermometers - J. Scient. Inst. 35, 334 - 1958.
- 16 - Moreau, Hall and Leaver : Mercury in quartz thermometers for very high accuracy - J. Scient. Inst. 34-147 - 1957.
- 17 - Ruh E. L. and Gonklin C. E. : Thermal stability in A. S. T. M. thermometers A. S. T. M. Bul. N°233, 35, 135 - 1958.
- 18 - Guillaume C. E. - Traite Practique de la Thermometrie - Gauthier Vilars et Fils. - Paris - 1889 - pág. 99.
- 19 - Hall J. A. and Leaver V. M. : The design of mercury thermometers for calorimetry - J. Scient. Inst. 36-183 - 1959.
- 20 - Harper D.R. - 3d. Thermometrie lag - Bul. B38 - 1912 - S185.
- 21 - P. T. B. Prüfredeln: Flüssigkeits-Glasthermometer 14.01-67 - pág. 41.
- 22 - Harper D.R. - 3d. Thermometrie lag - Bul. B38 - 1912 - S185.
- 23 - White W. P. - Lag effects and other errors in calorimetry - Phys. Rev. 31-562 - 1910.
- 24 - Hall J. A. and Leaver V. : The emergent column in mercury thermometers - J. of Scien. Instr. - Vol. 5 - pág. 93 - 1958.
- 25 - Pemberton L. H. : Further consideration of emergent column correction in mercury thermometers - J. Scient. Inst. - Vol. 41 - pág. 234 - abril 1964.
- 26 - P. T. B. Prüfredeln: Flüssigkeits-Glasthermometer 14.01-67 - pág. 27.
- 27 - P. T. B. Prüfredeln: Flüssigkeits-Glasthermometer 14.01-67 - pág. 50.
- 28 - N. P. L. Measurements Services - Temperature - 1971.
- 29 - Hill J. J. - Platinun Resistance Thermometry using and A. C. Inductive Radio Bridge - Inst. Soc. of America - September 11, 14 - 1967.
- 30 - Diesselhorst-Hausrath Potentiometers - Phys. Research Labor. Techn. - Note N°331-PD-H.
- 31 - Van der Wall and Struik: A direct-reading bridge for a platinun resistance thermometers - J. of Scient. Instr. - Serie 2, Vol. 2 - 1969.
- 32 - Dauphine J. M. : Potentiometric Method of Resistance Measurement - Temperature, its measurement and control in Science and Industry - Vol. 3 -

Parte 1 - pág. 269 - 1962.

- 33 - Hall J. A. : The International Temperature Scale - Temperature, its Measurement and Control in Science and Industry - Vol. 2 - pág. 115 - 1954.
- 34 - P. T. B. Prüfregelein; Flüssigkeits-Glathermometer 14.01-67- pág. 73.
- 35 - V.D.E./V.D.I. 3511-Richtlinien - Februar 1967 - pág. 32 - V.D.I. - Gmbh Dusseldorf 1967.
- 36 - Grace and Hall : A Bath for use in the graduation and testing of thermometers - J. of Scient. Inst. - Vol. 20 - N°4 - Abril 1943.
- 37 - Hall J. A. and Barber C. R. : Notes on Applied Science N° 12 - N. P. L. - 1964 - pág. 42.
- 38 - Webb and Robinsen : An improved oil bath for thermometers - Journal of Physics E.: Scient. Instruments - Vol. 6 - 1973.

**Impreso en el Instituto Nacional de Tecnología Industrial  
Libertad 1235 - T.E. 44-0011 - Buenos Aires - Rep.Arg.  
DICIEMBRE DE 1975**

PRINTED IN ARGENTINA  
IMPRESO EN LA ARGENTINA

Queda hecho el depósito  
legal que marca la ley  
11.723. © INTI, 1975

