

## Calibración de Temperatura; profundidades de inmersión

Autor: P. John Tavener  
Compañía  
Isothermal Technology Limited, Pine Grove, Southport, Inglaterra,  
E-mail: jpt@isotech.co.uk  
Tel: +44 (0) 1704 543830 Fax: +44 (0) 1704 544799

### Resumen

Of all the sources of errors and uncertainties in thermal calibration by far the largest source of error and least understood effect is that of immersion of unit under test, and the reference standard.

Little is written about this parameter as it is not considered part of the specification provided by a producer of calibration equipment, it is the responsibility of the user to evaluate the immersion properties of the sensors being calibrated.

In this paper immersion depths are considered in stirred liquid baths and in block baths, where there is an air gap.

Three levels of uncertainties are considered and how the accuracy required affects the immersion.

Graphs are presented that easily permit a user to gauge the depth of immersion required. Practical examples are given.

#### 1. Introduction

It is a fundamental of temperature measurement that temperature sensors measure their own temperature, and only when sufficiently immersed in the object whose temperature is desired will the sensor reach that temperature.

The purpose of this article is to develop some simple, practical rules to help when immersion depths are being considered.

#### 2. Reviewing Existing Literature

The first place to look for guidance is a book called "Supplementary Information to the International Temperature Scale of 1990". It says:-

De todas las fuentes de errores e incertidumbre aplicables a la calibración térmica, la fuente más grande de error y menos comprendida es el efecto de la inmersión entre la unidad bajo prueba y el estándar de referencia

Poco se ha escrito acerca de este parámetro, ya que no se considera parte de la especificación provista por el fabricante del equipo de calibración, es responsabilidad del usuario evaluar las propiedades de la inmersión de los sensores que serán calibrados.

En este documento se consideran las profundidades de inmersión en los baños de líquidos y los baños de bloque seco donde hay un espacio de aire.

Hay tres niveles de incertidumbre que son consideradas y cómo la precisión requerida es afectada por la inmersión.

Se presentan gráficos que permiten fácilmente al usuario medir la profundidad de inmersión requerida y se dan ejemplos prácticos.

#### 1. Introducción

Es un principio de la medición de temperatura que los sensores miden su propia temperatura y sólo cuando los sensores son suficientemente sumergidos en el objeto del cual la temperatura se desea medir, el sensor alcanzará esa temperatura

El propósito de este artículo es desarrollar algunas reglas sencillas y prácticas para ayudar a que la profundidad de inmersión este siendo considerada.

#### 2. Revisión de la literatura existente

El primer lugar para buscar orientación es el libro llamado "información complementaria a la Escala Internacional de Temperatura de 1990". Dice:

"A thermometer is sufficiently immersed when there is no change in indicated temperature with additional immersion in a constant temperature environment".

It then goes on to say:

"Although at temperatures above room temperature the required immersion depth initially increases with temperature, a maximum is reached at temperatures in the region of 400°C to 500°C, after which the rapidly rising radial heat transfer by radiation causes it to fall slightly; this is on the assumption of the presence of adequate longitudinal radiation baffles and the inhibition of radiation piping".

Next place to look for practical information is the excellent book by Nicholas and White titled "Traceable Temperatures". Fortunately they deal with immersion depths in a very practical way and are brave enough to put numbers to their descriptions. They say about immersion depth:

"The general problem occurs because there is a continuous flow of heat along the stem of a thermometer between the medium of interest and the outside world. Since heat can only flow where there is a temperature difference, the flow of heat is evidence that the tip of the thermometer is at a slightly different temperature than the medium of interest". This is shown graphically in figure 1.0.

"Un termómetro está suficientemente sumergido cuando no hay ningún cambio en la temperatura indicada con la inmersión adicional en un entorno de temperatura constante".

A continuación, sigue diciendo:

"Aunque a temperaturas superiores a la temperatura ambiente, la profundidad de inmersión requerida inicialmente aumenta con la temperatura, el máximo se alcanza en la región de 400 ° C a 500 ° C, después del cual el rápido aumento de la transferencia de calor por radiación radial hace que caiga un poco; esto es en el supuesto de la presencia de adecuada radiación longitudinales y la inhibición de la radiación de la tubería".

Otro lugar para buscar información práctica es el excelente libro de Nicholas y White titulado "Trazabilidad de temperaturas". Afortunadamente, tratan el tema de profundidades de inmersión en una manera muy práctica y son lo suficientemente arriesgados como para poner números a sus descripciones. Ellos dicen de la profundidad de inmersión:

"El problema general se produce porque hay un flujo de calor continuo a lo largo del tubo de un termómetro entre el medio de interés y el mundo exterior. Puesto que el calor sólo puede fluir donde hay una diferencia de temperatura, el flujo de calor es evidencia de que la punta de la termómetro está a una temperatura ligeramente diferente que el medio de interés". Esto se muestra gráficamente en la figura 1.0.

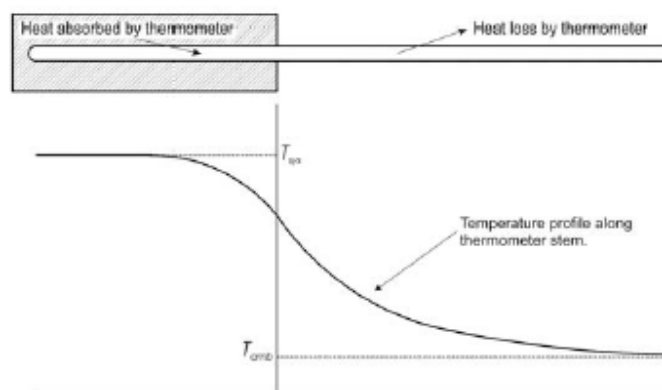


Figure 1.0. The flow of heat down the stem of a thermometer causes the thermometer to indicate temperatures slightly lower than that of the medium of interest.

A simple model of this effect relates the error in the thermometer reading to the length of immersion by:

$$\Delta T_m = (T_{sys} - T_{amb})k \left( \frac{-L}{D_{eff}} \right)$$

Where  $T_{sys}$  and  $T_{amb}$  are the system and ambient temperatures respectively,  $L$  is the length of the immersion,  $D_{eff}$  is the effective diameter of the thermometer, and  $k$  is a constant approximately equal to, but less than 1. This equation, which is plotted in figure 1.1 for  $k = 1$ , is very useful for determining the minimum immersion which will ensure that the error is due to stem conduction is acceptable.

Figura 1.0. El flujo de calor hacia abajo en el tubo del termómetro causa que el termómetro indique temperaturas ligeramente inferiores a la del medio de interés.

Modelo simple de este efecto relativo al error en la lectura del termómetro por la longitud de inmersión:

$$\Delta T_m = (T_{sys} - T_{amb})k \left( \frac{-L}{D_{eff}} \right)$$

Donde  $T_{sys}$  y  $T_{amb}$  son la temperatura del sistema y del ambiente, respectivamente,  $L$  es la longitud de la inmersión,  $D_{eff}$  es el diámetro efectivo del termómetro, y  $k$  es una constante aproximadamente igual a 1. Esta ecuación, que se representa en la figura 1.1 para  $k = 1$ , es muy útil para determinar la inserción mínima que garantice que el error debido a la conducción es aceptable.

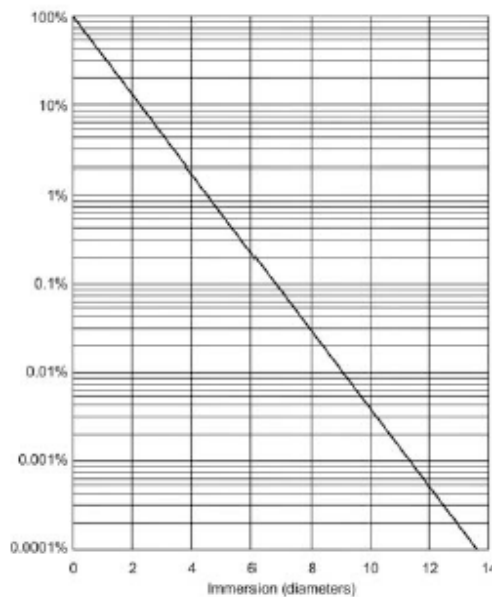


Figure 1.1. The relative temperature error  $\frac{\Delta T_m}{T_{sys} - T_{amb}}$  plotted against thermometer immersion length in diameters. This graph works well for sensors immersed in stirred liquid.

We recognise three useful rules of thumb from the figure:

Figura 1.1. Error de temperatura relativa  $\frac{\Delta T_m}{T_{sys} - T_{amb}}$  comparado contra la longitud de inmersión de un termómetro en diámetros. Este gráfico es adecuado para los sensores sumergidos en líquido agitado.

Reconocemos tres reglas de oro de utilidad de la figura:

(i) for 'industrial' thermometry we recommend 5 diameter immersion suitable for 1% accuracy.

(ii) for good laboratory thermometry we recommend 10 diameter immersion for 0.01% accuracy.

(iii) For best laboratory practice we recommend 15 diameter immersion suitable for 0.0001% accuracy.

The length of the sensing element which would normally be a thermocouple junction, a thermistor or a Pt100 element must be added to the immersion since none of the sensing element should be in the stem conduction gradient.

So there we have it; a formula that gives correct results in a "good stirred oil bath".

In the above formula we need to increase the immersion with temperature. However if we take the advice of ITS-90 Supplementary Information and calculate the depth at 500°C then this should be adequate for temperatures above 500°C.

Having identified 3 immersion depths for Industrial, Laboratory and Best practice the next section will deal with each of these in more detail.

### 3. Industrial Thermometry

Here we can site examples such as a thermowell and a dry block calibrator.

The thermowell is common and often has an outside diameter to length ratio of about 1:5 i.e. most industrial installations are designed for ~1% accuracy. They usually perform a little better than this because the thermowell does not protrude into the ambient space as a thermometer usually would (this gives a k value less than 1.0). The main point of the example is that we need to think about the outside diameter of the 'installation' and not in terms of the diameter of the probe within the thermowell.

(i) Para termometría industrial recomendamos 5 diámetros de inmersión adecuado para el 1% de precisión.

(ii) Para termometría de laboratorio se recomienda 10 diámetros de inmersión para 0,01% precisión.

(iii) Para las mejores prácticas de laboratorio, se recomiendan 15 diámetros de inmersión adecuados para 0,0001% de precisión.

La longitud del elemento sensor, que podría ser normalmente una termocupla, un termistor o un elemento Pt100 debe sumarse a la inmersión ya que ninguno elemento sensor debe estar en el gradiente de conducción del tubo.

Así que ahí lo tenemos, una fórmula que da resultados correctos en un "bien agitado baño de aceite".

En la fórmula anterior, tenemos que aumentar la inmersión con la temperatura. Sin embargo, si tomamos el consejo de la Información complementaria de ITS-90 y calculamos la profundidad a 500 ° C, entonces este debe ser adecuado para temperaturas superiores a 500 ° C.

Una vez identificadas las profundidades de inmersión para el sector industrial, de laboratorio y las mejores prácticas la próxima sección se relacionará con estos con más detalle.

### 3. Termometría Industrial

Aquí podemos citar ejemplos como una termovaina y un calibrador de bloque seco.

La vaina es común y con frecuencia tiene un diámetro exterior de relación de longitud de alrededor de 1:5, es decir la mayoría de las instalaciones industriales están diseñadas para ~ 1% de precisión. Por lo general, es un poco mejor porque la vaina no sobresale en el espacio como un termómetro de ambiente normalmente lo haría (esto le da un valor de k menor de 1,0). El punto principal del ejemplo es que tenemos que pensar en el diámetro expuesto y no en términos del diámetro de la sonda dentro de la vaina.

The dry block calibrator is also a good example. Again one has to think about the diameter of the installation - in this case the diameter of the inserts (that have the thermometer wells drilled into them) mounted in the controlled space. The diameter is usually about 50mm, and if you're very lucky you might have an insert with a length of 250mm. Typically the temperature at the bottom of the insert is controlled to about 5% so there are large temperature gradients through the bottom of the insert. And no matter how thin your thermometer the immersion errors will normally be dominated by the poor immersion of the insert.

The insert immersion errors can be largely overcome if the standard to which industrial sensors are being compared is also placed in the insert and if the standard is of similar construction as the sensors being calibrated.

Sensors in thermowells or dry block calibrators will not absorb and lose heat in the same way in which they do in a stirred liquid bath and Nicholas and White's figure does not directly apply.

This is because they assume that they assume:  $\frac{D_{(eff)}}{D} = 1$ , which it is for stirred liquid baths.

However  $\frac{D_{(eff)}}{D}$  will be greater than 1 if there is an air gap such as in a metal block calibration bath.

Let me therefore do a second example where we wish to calibrate a 6mm diameter thermocouple at 500°C above ambient in a metal block bath to an accuracy of 0.5°C.

Then referring to figure 1.1 I found that for  $D_{(eff)} = D = 1$  the minimum immersion is 7 diameters or 42.00mm. However, if  $D_{(eff)} = 2D$  then this would increase to 84.00mm.

What Nicholas & White do not do is to give figures of  $\frac{D_{(eff)}}{D}$  for metal block calibrators.

El calibrador de bloque seco es también un buen ejemplo. Una vez más uno tiene que pensar en el diámetro de la instalación - en este caso el diámetro del inserto (que tiene una perforación para la termovaina) montado en el espacio controlado. El diámetro es usualmente de unos 50 mm, y si tiene mucha suerte podría tener una inserción con una longitud de 250mm. Normalmente, la temperatura en la parte inferior de la inserción es controlada alrededor del 5% por lo que hay grandes gradientes de temperatura a través de la parte inferior del inserto. Y no importa lo delgado de su termómetro de inmersión, los errores estarán dominados normalmente por la pobre inmersión.

Los errores de inserción de inmersión pueden ser superados en gran medida si la norma con la que los sensores industriales se comparan es considerada para el inserto en el cual los sensores están siendo calibrados.

Los sensores en termopozos o calibradores de bloque seco no absorberán y perderán el calor de la misma forma en que lo hacen en un baño líquido agitado y entonces el gráfico de Nicholas and White no es aplicable directamente.

Esto es por que ellos asumen que:  $\frac{D_{(eff)}}{D} = 1$  es para baños líquidos.

Sin embargo  $\frac{D_{(eff)}}{D}$  será mayor que 1 por que hay un espacio de aire en la calibración de bloque seco.

En este segundo ejemplo, deseamos calibrar un termómetro de 6mm de diámetro a una temperatura de 500°C por encima del ambiente en un bloque seco con una precisión de 0.5°C.

Refiriéndonos a la figura 1.1 encontramos que para  $D_{(eff)} = D = 1$  la inmersión mínima es 7 diámetros or 42.00mm. Sin embargo si  $D_{(eff)} = 2D$  entonces esta será incrementada a 84.00mm.

Nicholas & White no suministran el gráfico de  $\frac{D_{(eff)}}{D}$  (para bloques secos).

Fortunately at the Northern Temperature Primary Laboratory we have evaluated fully many metal block baths of our own design at various temperatures over a number of years. Using the figure of 0.5°C as a criterion I find in general, almost irrespective of the temperature (tests were conducted at 250°C, 450°C and 650°C) that 80mm immersion was required for a 6mm type N thermocouple in a 6.50mm hole for stem conduction / vertical thermal profile of the metal block insert to be less than 0.5°C, thus confirming a figure of

$$\frac{D_{(eff)}}{D} = 2$$

For industrial platinum thermometers we must add around 40mm for the sensor making 120mm. However we need greater accuracy than with thermocouples (say 0.05°C) thus we need to immerse a further 25mm, making a total of 145mm of immersion.

Thanks to the combined efforts of the above authors it is possible to generate some rules that are truly practical. We can use figure 1.1 for stirred liquid baths and figure 1.2 for metal block baths with small air gaps.

Afortunadamente, en el Laboratorio de NPTL hemos evaluado totalmente muchos baños de bloque de metal de nuestro propio diseño a diferentes temperaturas durante varios años. Usando la cifra de 0,5 ° C, como criterio me parece, en general, casi independientemente de la temperatura (las pruebas se llevaron a cabo a 250 ° C, 450 ° C y 650 ° C) que una inmersión de 80 mm fue requerida para un termopar tipo N de 6mm en un agujero de 6.50mm para un perfil térmico vertical de conducción de menos de 0,5 ° C,

confirmando así la ecuación  $\frac{D_{(eff)}}{D} = 2$

Para termómetros de platino industrial hay que añadir alrededor de 40 mm alcanzando 120 mm. Sin embargo, necesitamos mayor precisión que con termopares (por ejemplo 0,05 ° C), lo que trae la necesidad de sumergir 25 mm mas, haciendo un total de 145 mm de inmersión.

Gracias a los esfuerzos combinados de los autores antes mencionados es posible generar algunas reglas que son realmente prácticas. Podemos usar la figura 1.1 para baños líquidos agitados y la figura 1.2 para baños de bloque seco con espacios de aire pequeño.

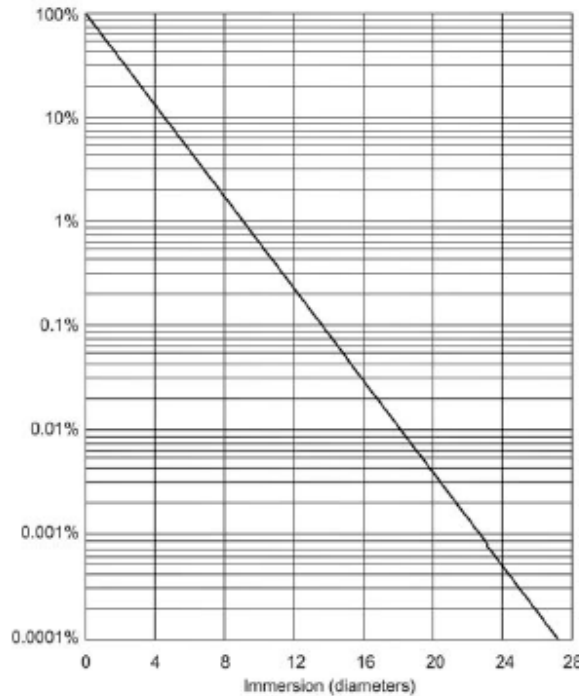


Figure 1.2. The relative temperature error  $\frac{\Delta T_m}{T_{sys} - T_{amb}}$

plotted against thermometer

immersion length in diameters, where  $\frac{D_{(eff)}}{D} = 2$ , such as a dry block calibrator.

Most good quality portable metal block baths have immersions of around 150mm. However as can be seen from the above as the diameter of the sensor to be calibrated increases we need greater immersions or we must reduce the accuracy of the calibration.

#### 4. Laboratory Thermometry

Here we can take the example of a stirred liquid bath and use the figure 1.1

##### Example

Determine the minimum immersion for a 4mm diameter sheathed thermometer with the detecting element occupying the last 40mm of the sheath. The measurement should have immersion errors of less than 0.01°C for temperatures up to 100°C.

First we determine the relative accuracy in the measurement as:

$$\left| \frac{\Delta T_m}{T_{sys} - T_{amb}} \right| = \frac{0,01}{100 - 20} \cong 0,01\%$$

Then, referring to figure 1.1, we find that the minimum immersion is a little more than 9 diameters. To be conservative we will immerse the thermometer to 10 diameters beyond the detector element, i.e. 80mm total immersion. Ten diameters is a useful rule-of-thumb for accurate thermometry ( $\sim \pm 0.01\%$ ). Five diameters are more typical of industrial thermometry ( $\sim \pm 1\%$ ).

#### 5. Best Laboratory Practice

The most exacting measurements made are the Standard Platinum Resistance Thermometers in Fixed Point Cells.

Figura 1.2. Error de temperatura relativa  $\frac{\Delta T_m}{T_{sys} - T_{amb}}$

versus la longitud de inmersión del termómetro en diámetros, donde  $\frac{D_{(eff)}}{D} = 2$ , como un calibrador de bloque seco.

La mayoría de los baños de metal de bloque seco de buena calidad tienen inmersiones de alrededor de 150 mm. Sin embargo como se desprende de lo anterior, el aumento del diámetro del sensor a calibrar, aumenta la inmersión necesaria o requiere reducir la exactitud de la calibración.

#### 4. Termometría de Laboratorio

Aquí podemos tomar el ejemplo de un baño líquido agitado y usar la figura 1.1

##### Ejemplo

Determine la inmersión mínima de un termómetro envainado de 4 mm de diámetro con un elemento sensor que ocupa los últimos 40 mm de la vaina. La medición debe tener errores de inmersión de menos de 0,01 ° C para temperaturas de hasta 100 ° C.

Primero, determinar la precisión relativa en la medición como:

$$\left| \frac{\Delta T_m}{T_{sys} - T_{amb}} \right| = \frac{0,01}{100 - 20} \cong 0,01\%$$

Luego, en referencia a la figura 1.1, encontramos que la inserción mínima es un poco más de 9 diámetros. Para ser conservadores tomaremos 10 veces el diámetro más allá del elemento detector, es decir, 80 mm de inmersión total. Diez veces el diámetro es una regla de oro para termometría precisa ( $\sim \pm 0.01\%$ ). Cinco diámetros son más típicos de la termometría industrial ( $\sim \pm 1\%$ ).

#### 5. Mejores prácticas de laboratorio

Las mediciones más exigentes se hicieron con Termómetros Standard de Resistencia de Platino y celdas de punto fijo.

The immersion of the thermometer in the metal of the fixed point cell is only 160mm to 200mm and an SPRT may require 300mm immersion. So how is it that the most exacting measurements in the World are made in the cells with blatantly lack of immersion depth?

The answer is simply that the temperature, above the cell and for a further 200mm is within, typically, 0.5°C of the cell itself thus the temperature gradient is only 0.5°C. This reduces the immersion depth required.

For example take a Zinc cell, with 200mm immersion.  
Tamb - T2 = 400°C  
If ΔTm required is 0.0001°C

Then we look at  $\frac{0,0001}{400}$   
or about 32 diameters + sensing length. (From figure 1.2 since the thermometer is in an air gap)

Now consider Tamb - T2 = 0.5°C

Now the measurement becomes

$\frac{0,0001}{0,5} = 0,0002$  or only 16 diameters + sensing length.

A saving of 128mm of immersion for an 8mm diameter SPRT.

So in this example the depth of immersion required for accurate measurement is decreased because the temperature difference between the thermometer in the cell and in the apparatus just above it is small, typically 0.5°C.

## 6. Discussion

The above review shows ways of predicting the immersion depth required for various temperature sensors at various temperatures and of varying diameters.

The practical figures should enable the reader to better design an industrial installation or select calibration equipment.

La inmersión del termómetro en el metal de la celda de punto fijo es sólo de 160 mm de 200 mm y un SPRT puede requerir 300 mm de inmersión. Entonces, ¿cómo es que los más exigentes las mediciones en el mundo se hacen en celdas con esa flagrante falta de profundidad de inmersión?

La respuesta es simplemente que la temperatura, por encima de la celda y por más de 200 mm está dentro, típicamente, 0,5 ° C de la propia celda por lo tanto el gradiente de temperatura es de sólo 0,5 ° C. Esto reduce la profundidad de inmersión requerida.

Por ejemplo, tomar una celda de zinc, con 200 mm de inmersión. Tamb - T2 = 400 °C  
Si ΔTm requerido es de 0,0001 ° C

Entonces miremos a  $\frac{0,0001}{400}$   
o aproximadamente 32 diámetros + la longitud del sensor. (De la figura 1.2 ya que el termómetro está en un espacio de aire)

Ahora considere Tamb - T2 = 0,5 ° C

Ahora, la medición se convierte en

$\frac{0,0001}{0,5} = 0,0002$  o sólo 16 diámetros mas la longitud de sensor.

Un ahorro de 128 mm de inmersión para una SPRT de 8 mm de diámetro.

Así que en este ejemplo, la profundidad de inmersión requerida para la medición exacta se reduce porque la diferencia de temperatura entre el termómetro en la celda y en el aparato justo encima de la celda es pequeña, normalmente de 0,5 ° C.

## 6. Discusión

La revisión anterior muestra la manera de predecir la profundidad de inmersión requerida para diferentes sensores de temperatura a diferentes temperaturas y de diámetros variables.

Las cifras de la práctica deben permitir al lector, un mejor diseño de una instalación industrial o de la selección de un equipo de calibración



One word of caution however the above is a guide only. There are always exceptions, so follow Nicholas & White's advice:

"In all cases where immersion errors are suspected it is a very simple matter to vary the immersion depth by one or two diameters to see if the reading changes. As a crude approximation about 60% of the total error is eliminated each time the immersion is increased by 1 effective diameter".

#### References

1. Traceable Temperatures., J.V. Nichols & D.R. White. ISBN 471-49291-4
2. Supplementary Information for ITS-90. ISBN 92-822-211-3

Siempre hay excepciones, lo anterior es sólo una guía por lo que deben seguir los consejos de Nicholas & White:

"En todos los casos en que se sospecha de los errores de inmersión, es muy sencillo variar la profundidad de inmersión en uno o dos diámetros para ver si hay cambios de la lectura. Como una aproximación inicial, alrededor del 60% del error total se elimina cada vez que la inmersión se aumenta en un diámetro eficaz".

#### Referencias

1. Temperaturas trazables., J. V. Nichols & D.R. Blanco. ISBN 471-49291-4
2. Información complementaria para ITS-90. ISBN 92-822-211-3