

# CARACTERIZACIÓN DE ESTABILIDAD Y GRADIENTES PARA HORNO DE BLOQUE: SEGÚN GUÍA TÉCNICA PERTENECIENTE A CENAM.

Juan C. Echaurren  
Codelco Chile, División Codelco Norte  
56-55-330791 (fono/fax), jecha001@codelco.cl

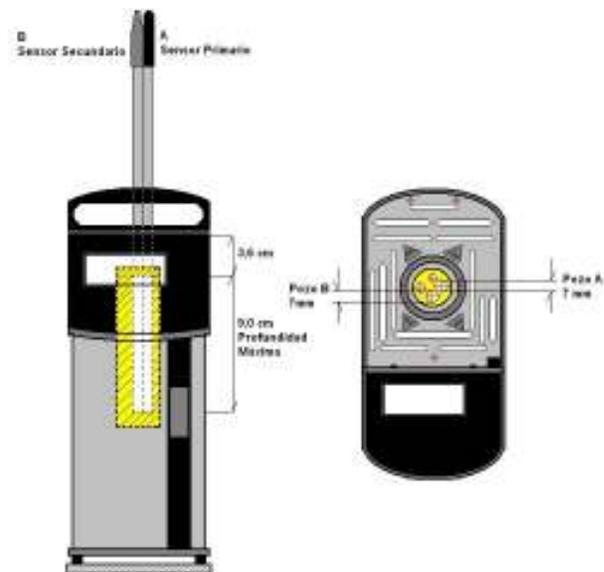
**Resumen:** En este trabajo se describen directrices de caracterización térmica, basadas en documento perteneciente a CENAM, México, Abril 2008, titulado: “Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre de las Mediciones en la Caracterización Térmica de Baños y Hornos de Temperatura Controlada” [1]. Estas directrices son aplicables a hornos de pozo seco, baños líquidos y de arena. Fueron realizadas en esta caracterización 1710 mediciones en tres puntos de medición y en tres profundidades para cada punto. Los resultados arrojan como conclusión, un 80 % de parámetros térmicos favorables para calibraciones a 9 cm de profundidad en pozo de trabajo B de este horno.

## 1. INTRODUCCIÓN.

Este trabajo muestra en detalle las directrices de caracterización de hornos de bloque, mencionadas en documento ideado por CENAM [1] en la guía técnica antes nombrada. En esta guía se describe la caracterización térmica de un horno de bloque, como una cuantificación de la uniformidad térmica del mismo, que le permite al metrólogo realizar tareas de calibración aplicando una mejor trazabilidad, es decir, realizar las compensaciones a las mediciones de las calibraciones de sistemas termométricos (analógicos y digitales) según los parámetros obtenidos durante la caracterización del horno. Esta uniformidad térmica es cuantificada según sus componentes principales: Estabilidad y Gradiente. Estabilidad térmica está definida como la capacidad de soportar la exposición por largo tiempo a temperaturas elevadas [2]. A su vez, el gradiente de temperatura está definido como el cociente de la diferencia de temperatura por la distancia, en dirección normal a la superficie isotérmica [2]. Mientras mayor es el número de mediciones de la caracterización, mayor es su grado de representatividad.

## 2. MEDICIONES Y CÁLCULOS.

Este horno de bloque fue caracterizado en 150 °C, 600 °C y 999 °C, y cada uno de estos puntos fue evaluado a 5 cm, 7 cm y 9 cm de profundidad en los pozos A y B. Un esquema de montaje es mostrado en Fig. 1, como sigue:



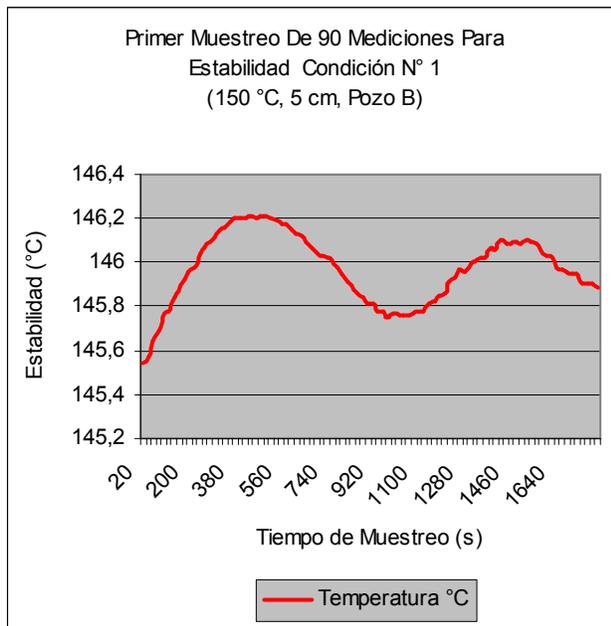
**Fig. 1** Vista frontal y superior con detalles de inserto y pozos utilizados.

En este documento se mostrará sólo una porción del trabajo de caracterización realizado, debido a que una versión completa es demasiado extensa para su inclusión en el formato utilizado aquí.

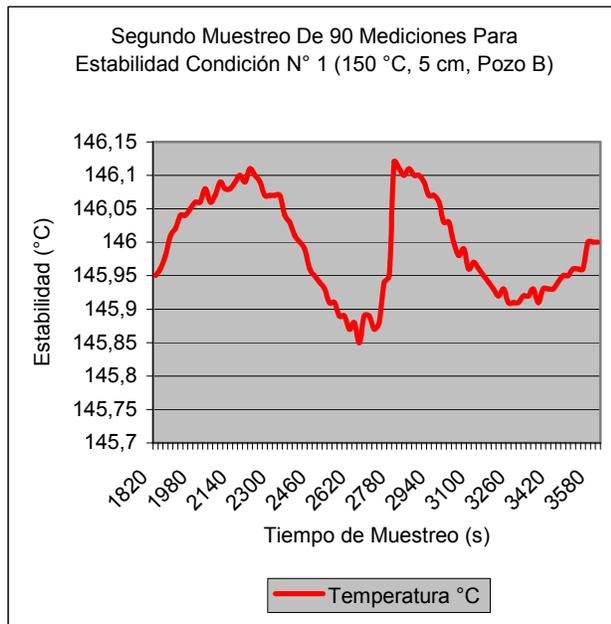
### 2.1. Condición de caracterización N° 1.

150 °C / 5 cm / pozo B / Termopar N.

Estabilidad térmica: 1 Lectura cada 20 segundos durante 1 hora, como se muestra en el siguiente gráfico:



**Gráfico 1.** Primer muestreo de 90 mediciones para la estimación de estabilidad térmica, condición N°1.



**Gráfico 2.** Segundo muestreo de 90 mediciones para la estimación de estabilidad térmica, condición N°1.

Límite superior = 146,21 °C.  
Límite Inferior = 145,54 °C.

Estimación de estabilidad térmica EST y uniformidad térmica de horno  $\mu_{UNIF-HORNO}$  para pozo B.

$$EST = (L_{SUP} - L_{INF}) / 12^{0,5} \cong 0,19 \text{ °C} \quad (1)$$

$$\mu_{UNIF-HORNO} = (EST^2 + \mu_{PATRÓN-REFERENCIA(K=1)}^2)^{0,5} \cong \pm 0,54 \text{ °C}. \quad (2)$$

Gradiente de temperatura ( $\Delta T$ ):

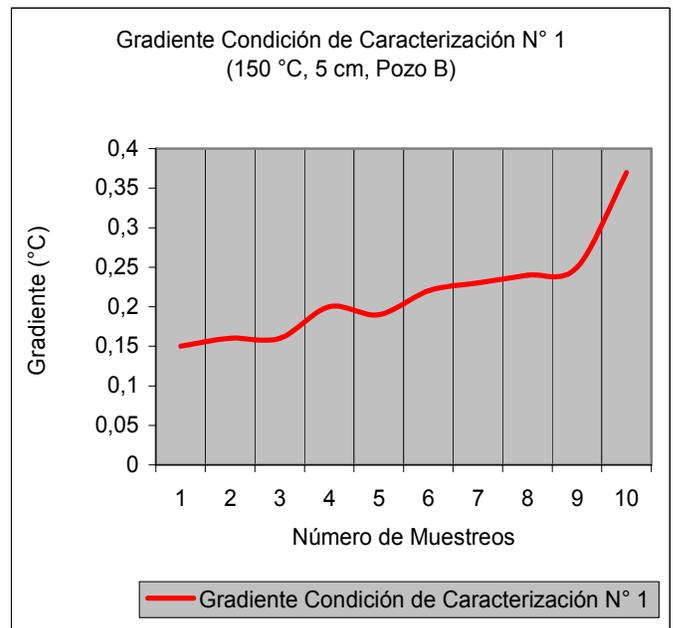
(a). Si  $|\Delta T| \leq (1/3) |EST| \Rightarrow$  Tomar N=5 Lecturas, tal que,  $\mu_{GRAD} \cong 0 \text{ °C}$ .

(b). Si  $|\Delta T| > (1/3) |EST| \Rightarrow$  Tomar N=10 Lecturas, tal que,  $\mu_{GRAD}$  sea :

$$\mu_{GRAD} = [(S_{GRAD} \times t/N^{0,5})^2 + \mu_{PATRÓN-REFERENCIA(1)}^2 + \mu_{PATRÓN-REFERENCIA(2)}^2]^{0,5} \quad (3)$$

Donde,  $S_{GRAD}$  es la desviación estándar experimental de los gradientes de temperatura  $\Delta T$ , t es el parámetro de Student y N es el número de muestreos para la determinación del gradiente de temperatura asociado al pozo de trabajo B.

Estimación del gradiente de temperatura  $\Delta T$  y  $\mu_{GRAD}$  para pozo B, para condición N° 1.



**Gráfico 3.** Primer muestreo de 10 mediciones para la estimación de el gradiente de temperatura, condición N°1.

$$\begin{aligned} \text{Gradiente}_{POZO B} &= \text{Media}_{POZO B} - \text{Media}_{POZO A} \\ &= \text{Media}_{GRAD} \cong 0,22 \text{ °C}. \end{aligned} \quad (4)$$

Dado que en todos los casos se cumplió  $|\Delta T| > (1/3) |EST| \cong 0,06 \text{ } ^\circ\text{C}$ , podemos estimar el valor de  $\mu_{GRAD}$  de acuerdo a la ecuación (3), como sigue:

$$\mu_{GRAD} \cong \pm 0,62 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Estimación de incertidumbre expandida de caracterización  $U_{K=2-CARAC}$  para el punto, pozo y profundidad consideradas.

$$U_{K=2-CARAC} = 2 \times (\mu_{UNIF-HORNO}^2 + \mu_{GRAD}^2)^{0,5} \cong \pm 1,64 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5)$$

Resumen N° 1.

POZO B<sub>150 °C\_5\_cm\_PROFUNDIDAD</sub>.

$$EST \cong 0,19 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\mu_{UNIF-HORNO} \cong \pm 0,54 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$(1/3) |EST| \cong 0,06 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

|Gradiente<sub>ΔT</sub>| siempre es  $> (1/3) |EST|$ .

$$\text{Media}_{GRAD}(N=10) \cong 0,22 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\mu_{GRAD} \cong \pm 0,62 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$U_{K=2-CARAC} \cong \pm 1,64 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

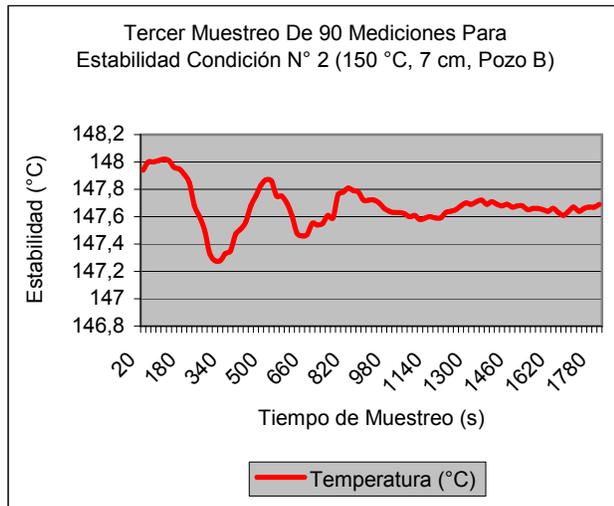
$$\text{Media}_{T^\circ\text{AMBIENTE}} \cong 17,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\text{Media}_{\%RH\text{AMBIENTE}} \cong 25,3 \text{ } \%$$

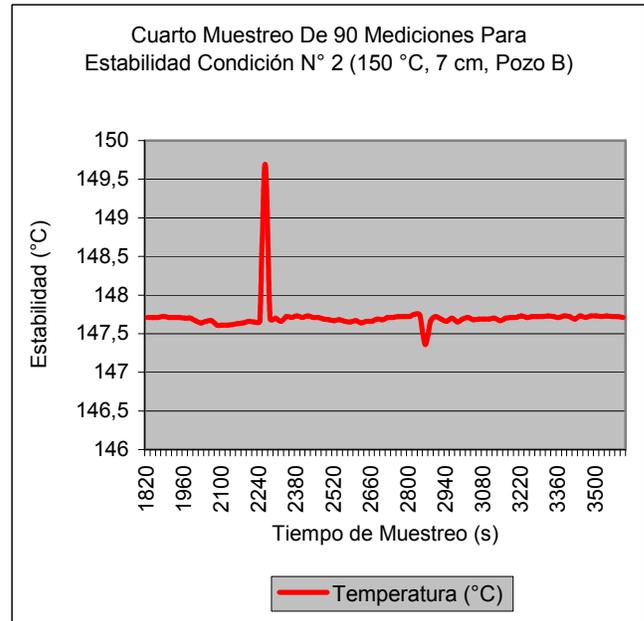
## 2.2. Condición de caracterización N° 2.

150 °C / 7 cm / pozo B / Termopar N.

Estabilidad térmica: 1 Lectura cada 20 segundos durante 1 hora, como se muestra en el siguiente gráfico:



**Gráfico 4.** Tercer muestreo de 90 mediciones para la estimación de estabilidad térmica, condición N°2.



**Gráfico 5.** Cuarto muestreo de 90 mediciones para la estimación de estabilidad térmica, condición N°2.

Límite superior = 149,69 °C.

Límite inferior = 147,28 °C.

Estimación de estabilidad térmica EST (ecuación 1) y uniformidad térmica de horno  $\mu_{UNIF-HORNO}$  (ecuación 2) para pozo B.

$$EST = (L_{SUP} - L_{INF}) / 12^{0,5} \cong 0,70 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\mu_{UNIF-HORNO} = (EST^2 + \mu_{PATRÓN-REFERENCIA(K=1)}^2)^{0,5} \cong \pm 0,86 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Gradiente de temperatura ( $\Delta T$ ):

(c). Si  $|\Delta T| \leq (1/3) |EST| \Rightarrow$  Tomar N=5 Lecturas, tal que,  $\mu_{GRAD} \cong 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

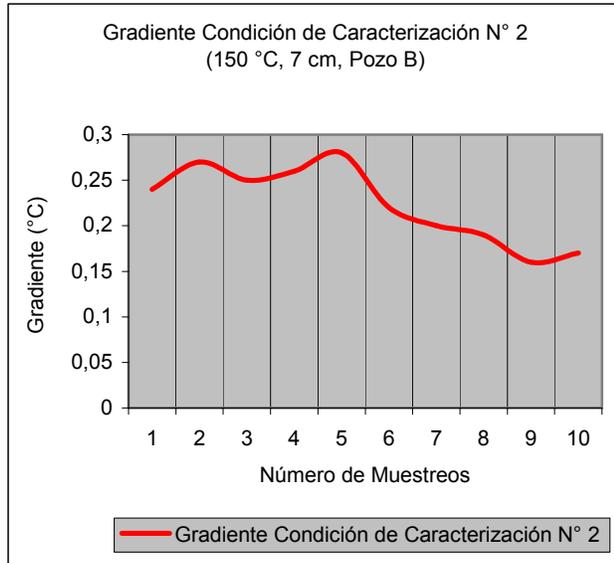
(d). Si  $|\Delta T| > (1/3) |EST| \Rightarrow$  Tomar N=10 Lecturas, tal que,  $\mu_{GRAD}$  sea:

$$\mu_{GRAD} = [(S_{GRAD} \times t / N^{0,5})^2 + \mu_{PATRÓN-REFERENCIA(1)}^2 + \mu_{PATRÓN-REFERENCIA(2)}^2]^{0,5}.$$

(e). Si las condiciones (c) y (d) se cumplen ambas en un 50%, entonces se aplica el peor de los casos (d) en donde N=10 y  $\mu_{GRAD}$  de acuerdo a la función especificada en la ecuación (3).

Donde además,  $S_{GRAD}$  es la desviación estándar experimental de los gradientes de temperatura  $\Delta T$ ,  $t$  es el parámetro de Student y  $N$  es el número de muestreos para la determinación del gradiente de temperatura asociado al pozo de trabajo B.

Estimación del gradiente de temperatura  $\Delta T$  (ecuación 4) y  $\mu_{GRAD}$  para pozo B, para condición N° 2.



**Gráfico 6.** Segundo muestreo de 10 mediciones para la estimación de el gradiente de temperatura, condición N° 2.

$$\begin{aligned} \text{Gradiente}_{\text{POZO B}} &= \text{Media}_{\text{POZO B}} - \text{Media}_{\text{POZO A}} \\ &= \text{Media}_{\text{GRAD}} \cong 0,22 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Dado que en esta tabla se cumple lo mencionado en (e), podemos estimar el valor de  $\mu_{GRAD}$  de acuerdo a la ecuación (3) como sigue:

$$\mu_{GRAD} \cong \pm 0,62 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Estimación de incertidumbre expandida de caracterización  $U_{K=2-CARAC}$  (ecuación 5) para el punto, pozo y profundidad consideradas.

$$\begin{aligned} U_{K=2-CARAC} &= 2 \times (\mu_{UNIF-HORNO}^2 + \mu_{GRAD}^2)^{0,5} \\ &\cong \pm 2,11 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Resumen N° 2.

Pozo B<sub>150 °C, 7 cm, PROFUNDIDAD</sub>  
EST  $\cong 0,70 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

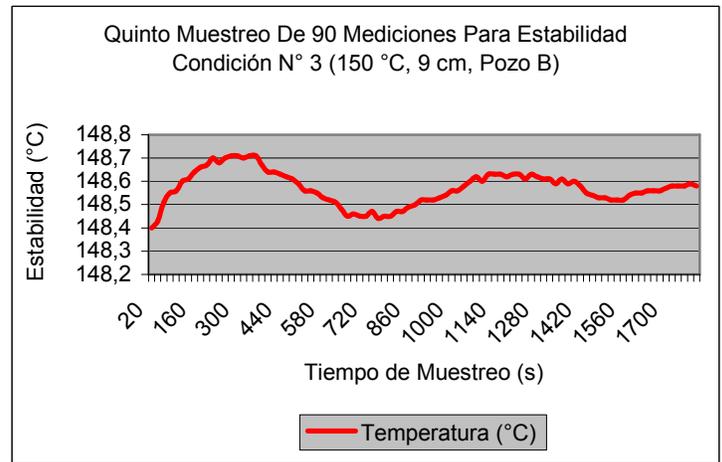
$\mu_{UNIF-HORNO} \cong \pm 0,86 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

$$\begin{aligned} (1/3) |EST| &\cong 0,23 \text{ } ^\circ\text{C}. \\ | \text{Gradiente}_{\Delta T} | &\text{ según (e)}. \\ \text{Media}_{GRAD}(N=10) &\cong 0,22 \text{ } ^\circ\text{C}. \\ \mu_{GRAD} &\cong \pm 0,62 \text{ } ^\circ\text{C}. \\ U_{K=2-CARAC} &\cong \pm 2,11 \text{ } ^\circ\text{C}. \\ \text{Media}_{T^\circ\text{AMBIENTE}} &\cong 17,9 \text{ } ^\circ\text{C}. \\ \text{Media}_{\%RH\text{AMBIENTE}} &\cong 29,4 \text{ } \%. \end{aligned}$$

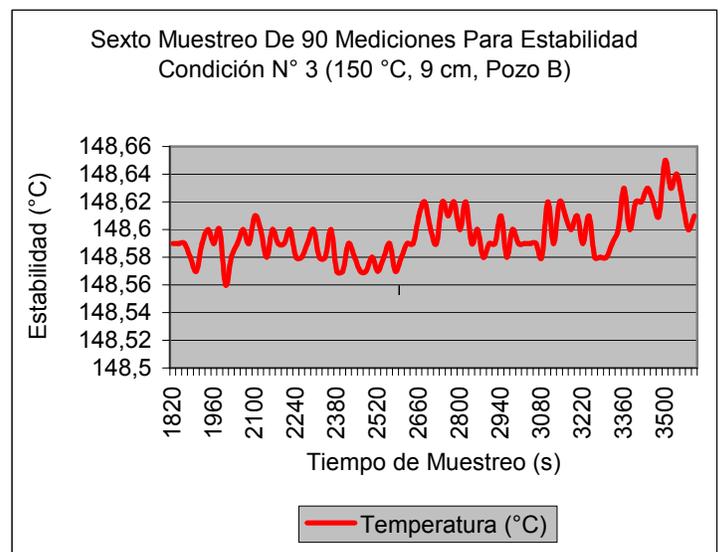
**2.3. Condición de caracterización N° 3.**

150 °C / 9 cm / pozo B / Termopar N.

Estabilidad térmica: 1 Lectura cada 20 segundos durante 1 hora, como se muestra en el siguiente gráfico:



**Gráfico 7.** Quinto muestreo de 90 mediciones para la estimación de estabilidad térmica, condición N° 3.



**Gráfico 8.** Sexto muestreo de 90 mediciones para la estimación de estabilidad térmica, condición N° 3.

Límite superior =148,71 °C.  
 Límite inferior =148,40 °C.

Estimación de estabilidad térmica EST (ecuación 1) y uniformidad térmica de horno  $\mu_{UNIF-HORNO}$  (ecuación 2) para pozo B.

$$EST=(L_{SUP} - L_{INF}) / 12^{0,5} \cong 0,09 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$\mu_{UNIF-HORNO}=(EST^2 + \mu_{PATRÓN-REFERENCIA(K=1)}^2)^{0,5} \cong \pm 0,51 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Gradiente de temperatura ( $\Delta T$ ):

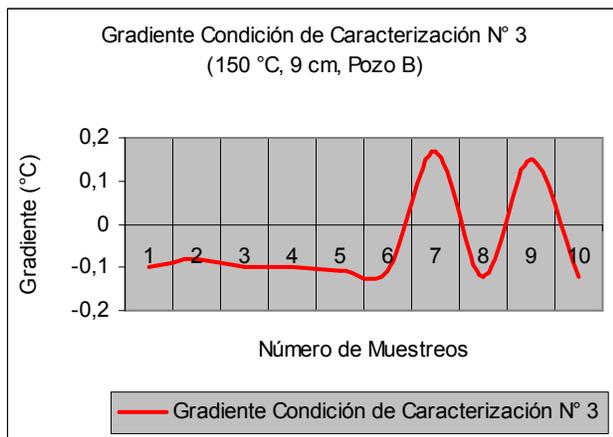
(f). Si  $|\Delta T| \leq (1/3)|EST| \Rightarrow$  Tomar N=5 Lecturas, tal que,  $\mu_{GRAD} \cong 0^\circ\text{C}$ .

(g). Si  $|\Delta T| > (1/3)|EST| \Rightarrow$  Tomar N=10 Lecturas, tal que,  $\mu_{GRAD}$  sea :

$$\mu_{GRAD}=[(S_{GRAD} \times t/N^{0,5})^2 + \mu_{PATRÓN-REFERENCIA(1)}^2 + \mu_{PATRÓN-REFERENCIA(2)}^2]^{0,5}.$$

Donde,  $S_{GRAD}$  es la desviación estándar experimental de los gradientes de temperatura  $\Delta T$ , t es el parámetro de Student y N es el número de muestreos para la determinación del gradiente de temperatura asociado al pozo de trabajo B.

Estimación del gradiente de temperatura  $\Delta T$  (ecuación 4) y  $\mu_{GRAD}$  para pozo B, para condición N° 3.



**Gráfico 9.** Tercer muestreo de 10 mediciones para la estimación de el gradiente de temperatura, condición N°3.

$$\text{Gradiente}_{POZO B} = \text{Media}_{POZO B} - \text{Media}_{POZO A}$$

$$= \text{Media}_{GRAD} \cong -0,05 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Dado que en todos los casos se cumplió  $|\Delta T| > (1/3)|EST| \cong 0,03 \text{ } ^\circ\text{C}$ , podemos estimar el valor de  $\mu_{GRAD}$  de acuerdo a la ecuación (3) como sigue:

$$\mu_{GRAD} \cong \pm 0,62 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Estimación de incertidumbre expandida de caracterización  $U_{K=2-CARAC}$  (ecuación 5) para el punto, pozo y profundidad consideradas.

$$U_{K=2-CARAC} = 2 \times (\mu_{UNIF-HORNO}^2 + \mu_{GRAD}^2)^{0,5} \cong \pm 1,60 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Resumen N° 3.

Pozo B<sub>150 °C\_9 cm\_PROFUNDIDAD</sub>.

EST  $\cong 0,09 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

$\mu_{UNIF-HORNO} \cong \pm 0,51 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

$(1/3)|EST| \cong 0,03 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

$|\text{Gradiente}_{\Delta T}|$  siempre es  $> (1/3)|EST|$ .

$\text{Media}_{GRAD}(N=10) \cong -0,05 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

$\mu_{GRAD} \cong \pm 0,62 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

$U_{K=2-CARAC} \cong \pm 1,60 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

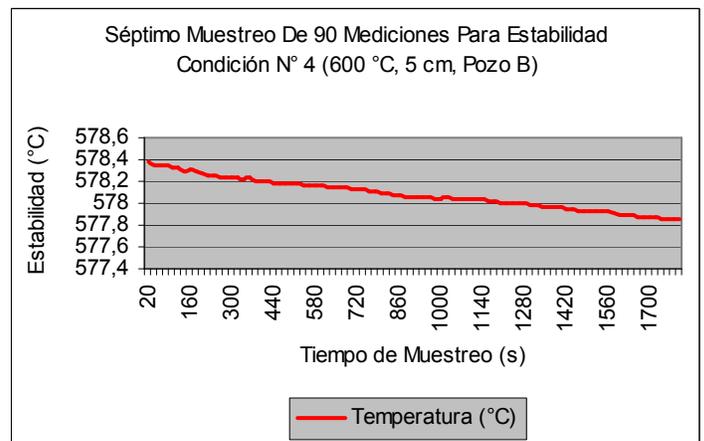
$\text{Media}_{T^\circ\text{AMBIENTE}} \cong 24,07 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

$\text{Media}_{\%RH\text{AMBIENTE}} \cong 25,9 \%$ .

**2.4. Condición de caracterización N° 4.**

600 °C / 5 cm / pozo B / Termopar N.

Estabilidad térmica: 1 Lectura cada 20 segundos durante 1 hora, como se muestra en el siguiente gráfico:



**Gráfico 10.** Séptimo muestreo de 90 mediciones para la estimación de estabilidad térmica, condición N°4.



**Gráfico 11.** Octavo muestreo de 90 mediciones para la estimación de estabilidad térmica, condición N°4.

Límite superior = 578,38 °C.

Límite inferior = 577,61 °C.

Estimación de estabilidad térmica EST (ecuación 1) y uniformidad térmica de horno  $\mu_{UNIF-HORNO}$  (ecuación 2) para pozo B.

$$EST = (L_{SUP} - L_{INF}) / 12^{0,5} \cong 0,22 \text{ °C.}$$

$$\mu_{UNIF-HORNO} = (EST^2 + \mu_{PATRÓN-REFERENCIA(K=1)}^2)^{0,5} \cong \pm 1,52 \text{ °C.}$$

Gradiente de temperatura ( $\Delta T$ ):

(h). Si  $|\Delta T| \leq (1/3) |EST| \Rightarrow$  Tomar N=5 Lecturas, tal que,  $\mu_{GRAD} \cong 0 \text{ °C.}$

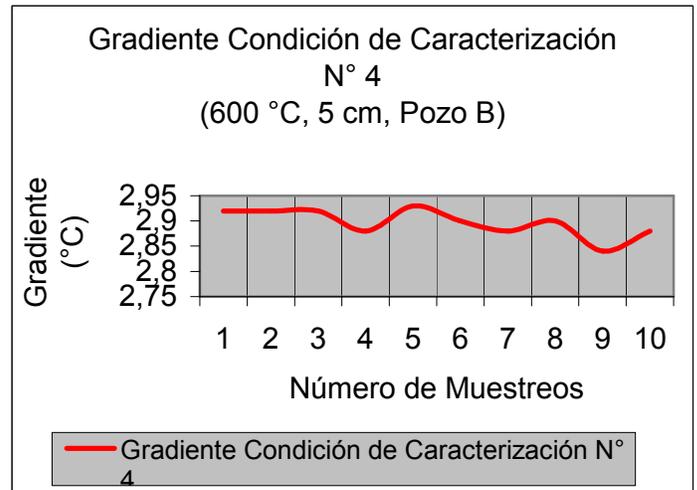
(i). Si  $|\Delta T| > (1/3) |EST| \Rightarrow$  Tomar N=10 Lecturas, tal que,  $\mu_{GRAD}$  sea :

$$\mu_{GRAD} = [(S_{GRAD} \times t/N^{0,5})^2 + \mu_{PATRÓN-REFERENCIA(1)}^2 + \mu_{PATRÓN-REFERENCIA(2)}^2]^{0,5} .$$

Donde,  $S_{GRAD}$  es la desviación estándar experimental de los gradientes de temperatura  $\Delta T$ , t es el parámetro de Student y N es el número de

muestras para la determinación del gradiente de temperatura asociado al pozo de trabajo B.

Estimación del gradiente de temperatura  $\Delta T$  (ecuación 4) y  $\mu_{GRAD}$  para pozo B, para condición N° 4.



**Gráfico 12.** Cuarto muestreo de 10 mediciones para la estimación de el gradiente de temperatura, condición N°4.

$$\begin{aligned} \text{Gradiente}_{POZO B} &= \text{Media}_{POZO B} - \text{Media}_{POZO A} \\ &= \text{Media}_{GRAD} \cong 2,90 \text{ °C.} \end{aligned}$$

Dado que en todos los casos se cumplió  $|\Delta T| > (1/3) |EST| \cong 0,07 \text{ °C}$ , podemos estimar el valor de  $\mu_{GRAD}$  de acuerdo a la ecuación (3) como sigue:

$$\mu_{GRAD} \cong \pm 1,57 \text{ °C.}$$

Estimación de incertidumbre expandida de caracterización  $U_{K=2-CARAC}$  (ecuación 5) para el punto, pozo y profundidad consideradas.

$$U_{K=2-CARAC} = 2 \times (\mu_{UNIF-HORNO}^2 + \mu_{GRAD}^2)^{0,5} \cong \pm 4,36 \text{ °C.}$$

Resumen N° 4.

POZO B<sub>600 °C\_5\_cm\_PROFUNDIDAD</sub>.

EST  $\cong 0,22 \text{ °C.}$

$\mu_{UNIF-HORNO} \cong \pm 1,52 \text{ °C.}$

$(1/3) |EST| \cong 0,07 \text{ °C.}$

$|\text{Gradiente}_{\Delta T}|$  siempre es  $> (1/3) |EST|$ .

$\text{Media}_{GRAD}(N=10) \cong 2,90 \text{ °C.}$

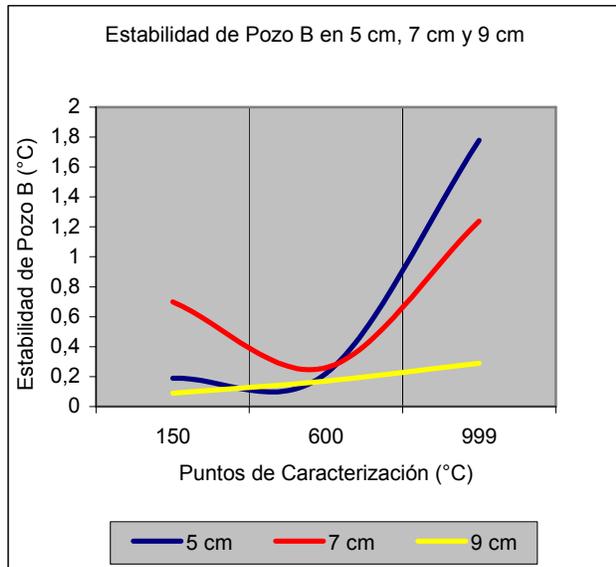
$\mu_{GRAD} \cong \pm 1,57 \text{ °C.}$

$U_{K=2-CARAC} \cong \pm 4,36 \text{ °C.}$

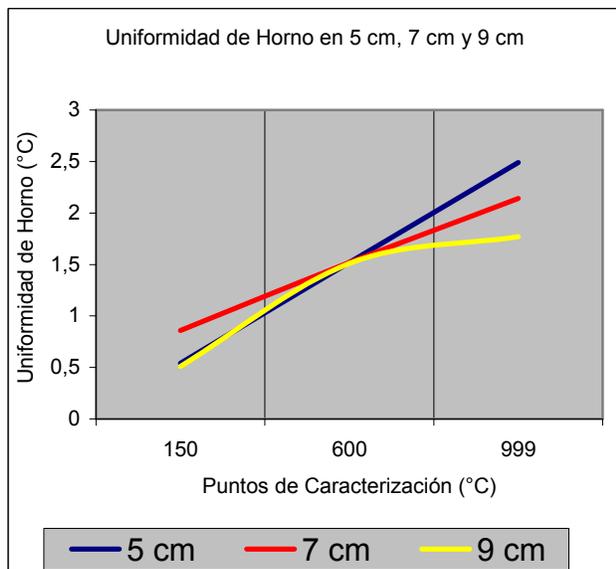
Media<sub>T°\_AMBIENTE</sub> ≅ 20,9 °C.  
 Media<sub>%RH\_AMBIENTE</sub> ≅ 25,5 %.

**3. RESULTADOS.**

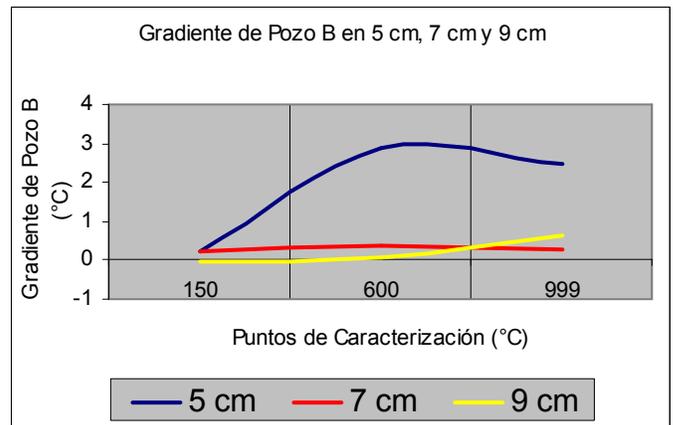
Debido a lo extenso de los detalles de cálculo y de los resultados obtenidos durante esta caracterización, se incluyen gráficos que resumen los mismos como se muestra a continuación:



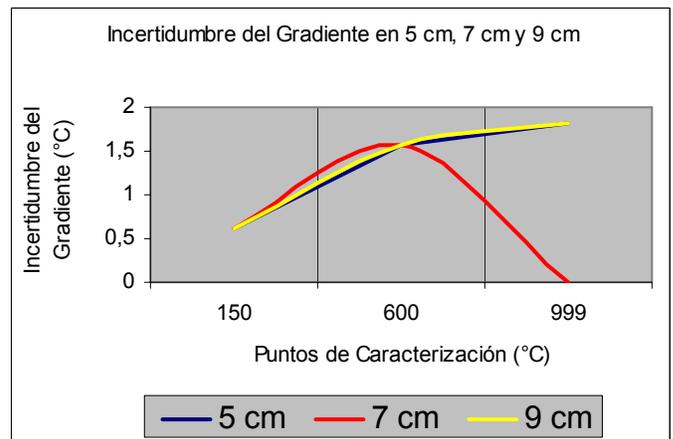
**Gráfico 13.** Resumen de resultados de caracterización para componente de estabilidad EST.



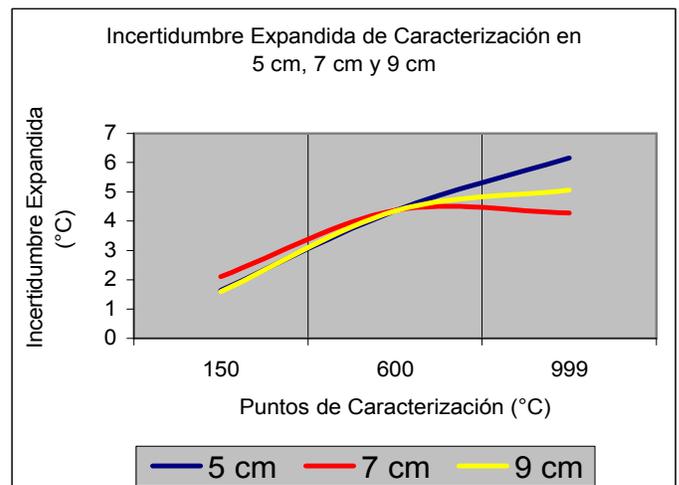
**Gráfico 14.** Resumen de resultados de caracterización para componente  $\mu_{UNIF-HORNO}$ .



**Gráfico 15.** Resumen de resultados de caracterización para componente  $GRAD_{N=10}$ .



**Gráfico 16.** Resumen de resultados de caracterización para componente  $\mu_{GRAD}$ .



**Gráfico 17.** Resumen de resultados de caracterización para componente  $U_{K=2-CARAC}$ .

#### 4. DISCUSIÓN.

En este trabajo se incluye una porción de los cálculos y directrices aplicadas durante la caracterización de un horno de bloque, la cual evaluó su comportamiento térmico en su pozo B, en tres puntos de trabajo específicos, 150 °C, 600° C y 999 °C, los que a su vez fueron estudiados en tres puntos de profundidad diferentes, 5 cm, 7 cm y 9 cm. El número de mediciones es fundamental para crear un mapa de comportamiento térmico, que sirva para realizar un trabajo de calibración óptimo de sistemas termométricos de medición analógicos y digitales. Es importante mantener un registro continuo de las condiciones medioambientales durante el proceso de caracterización, es decir, temperatura y porcentaje de humedad relativa. Durante las calibraciones en laboratorio de sistemas termométricos de medición, las variables del medio deben ser reproducidas si es posible, cercanas a los valores obtenidos en la caracterización, a fin de asegurar la trazabilidad de las mediciones.

#### 5. CONCLUSIONES.

Las conclusiones se obtienen de un examen de los resultados mostrados en los gráficos 13, 14, 15, 16 y 17 de la sección 3. Este examen muestra que un 80 % de los parámetros obtenidos a 9 cm de profundidad, ofrece las mejores condiciones durante la calibración de sistemas termométricos de medición analógicos y digitales para este horno, en su pozo de trabajo B.

#### REFERENCIAS.

- [1] Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre de las Mediciones en la Caracterización Térmica de Baños y Hornos de Temperatura Controlada, CENAM, México, Abril de 2008, [http://www.ema.org.mx/descargas/guias\\_tecnicas/calibracion\\_caracterizacion/BanosHornosv00.pdf](http://www.ema.org.mx/descargas/guias_tecnicas/calibracion_caracterizacion/BanosHornosv00.pdf) , octubre de 2008.
- [2] Vocabulario de IEC, <http://www.electropedia.org> , agosto de 2010.