

Introducción

Se trata de un estudio realizado con fines académicos, ya que este tema se encuadra dentro de lo que son las instalaciones eléctricas, y no se le brinda relevancia suficiente considerando que se presenta una ecuación que nos permite estimar cuánto puede sobrecargarse un conductor por encima de su capacidad nominal sin comprometer su vida útil, y se encuentra directamente relacionado a la selección de protecciones adecuadas.

Objetivos

- Analizar el comportamiento de cables eléctricos ante sobrecargas.
- Verificar críticamente la expresión que vincula la corriente de sobrecarga y el tiempo de desconexión dada por la norma ANSI/IEEE 242/86[1]
- Comprobar si las modificaciones de la última revisión de la norma han sido significativos [2]

Desarrollo

En la vida de un cable eléctrico se presentan tres estados de funcionamiento clásicos que se denominan:

- Régimen permanente.
- Régimen de sobrecarga.
- Régimen de cortocircuito.

El primero y el último de éstos regímenes, son los más conocidos al punto que todo fabricante incluye en sus catálogos información suficiente para calcular los cables ante estos estados de funcionamiento.

El régimen permanente es aquel donde circulando su corriente nominal durante un tiempo suficientemente largo, se alcanza una temperatura constante en el aislante tal que permite trabajar en tales condiciones durante su vida útil , usualmente 20 o 30 años. Para los cables aislados en polietileno reticulado, esta temperatura es de 90 °C, para el PVC es 70 °C.

En el régimen de cortocircuito, la corriente aumenta a un valor grande comparado con la de régimen permanente o nominal, se puede pensar en unas 25 veces, esto hace que la temperatura aumente rápidamente, el fenómeno se puede considerar adiabático y en los catálogos de fabricante es normal que se presentes las expresiones matemáticas para calcular el tiempo admisible en estas condiciones.

En el régimen de sobrecarga, la corriente que circula es mayor que la nominal o de régimen permanente admisible, pero bastante menor que la de cortocircuito, digamos unas ..3..4.. veces. Del calor que esta corriente genera por efecto Joule en el cable, una parte se utiliza para elevar la temperatura del cable y otra parte se disipa al ambiente, Esto origina que la temperatura en función del tiempo adquiera una forma exponencial con una dada constante de tiempo, como la que se ve en la gráfica de la figura 1.

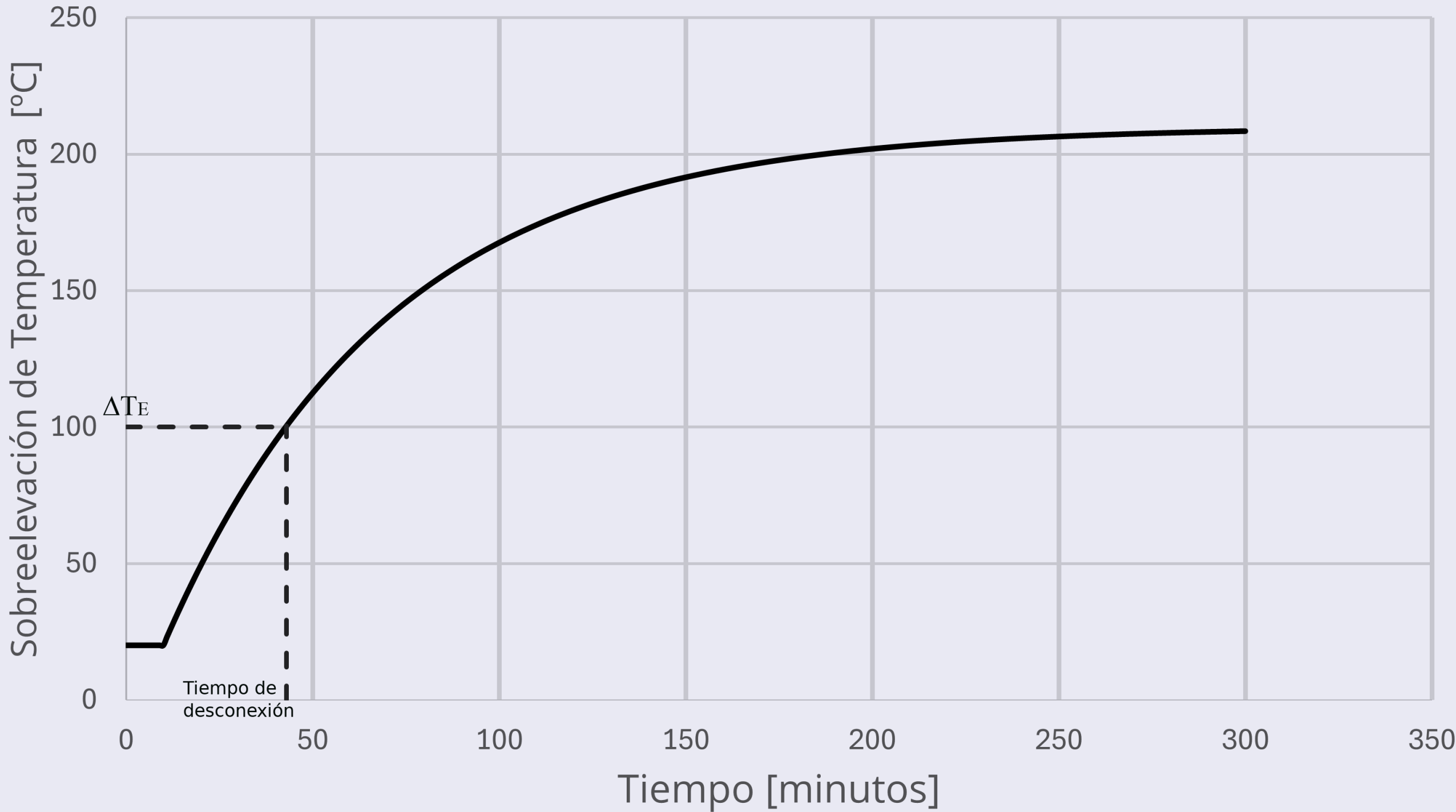


Figura 1: Sobreelevación de temperatura vs tiempo

La temperatura en el cable parte de la de equilibrio térmico para una dada corriente inicial, y comienza a aumentar, si no se toma ningún recaudo, la temperatura llegará a otro régimen estable, pero ahora con una temperatura que lo dañará, por lo que se debe interrumpir la corriente cuando la temperatura del cable alcance la temperatura admisible de emergencia T_E . Se admite que esta temperatura alcance los 130 ° C y 90 ° C para el XLPE y PVC respectivamente. Es aquí, en este régimen donde hace su aparición la norma ANSI/IEEE 242/86, dando la expresión que vincula la temperatura y las variables antes indicadas:

$$\frac{I_E}{I_N} = \sqrt{\frac{\left(\frac{T_E - T_0}{T_N - T_0} - \left(\frac{I_0}{I_N}\right)^2 e^{-t/K}\right)}{1 - e^{-t/K}}} \cdot \frac{(230 + T_N)}{(230 + T_E)} \tag{1}$$

Además, aparece en esta expresión, la corriente que circulaba por el cable antes de producirse la sobrecarga I_0 (precarga), la temperatura ambiente al momento de producirse la sobrecarga T_0 , la corriente nominal de catalogo I_N y la constante de tiempo térmica del cable en su forma de instalación, K . En esta expresión, dada la corriente de sobrecarga o emergencia I_E , se puede despejar el tiempo que esa sobrecarga puede ser mantenida sin sobrepasar la temperatura admisible para ese estado, T_E .

Se podría decir que en este punto comenzó nuestro trabajo, cuando intentamos utilizar la expresión dada por la norma ANSI/IEEE 242/86 y encontramos resultados incongruentes. Por ejemplo, para una dada corriente de precarga, cuando la temperatura ambiente disminuye, el tiempo de desconexión debe aumentar y aplicando la expresión ANSI/IEEE, se encuentra el comportamiento inverso. Dado que, utilizando ésta expresión el comportamiento esperado no se presenta, nos propusimos deducirla, y obtuvimos la siguiente:

$$\frac{I_E}{I_N} = \sqrt{\frac{\left(\frac{T_E - T_0}{T_N - T_{0max}} - \left(\frac{I_0}{I_N}\right)^2 \frac{1 + \alpha T_{reg}}{1 + \alpha T_N} e^{-t/K}\right)}{1 - e^{-t/K}}} \cdot \frac{(230 + T_N)}{(230 + T_{max})} \tag{2}$$

Se ve que la expresión encontrada es enteramente similar a la de la norma ANSI, pero se pueden ver tres diferencias: Dos de ellas, se podrían tomar como aproximaciones con vistas a simplificar el uso, pero T_0 en lugar de T_{0max} , es más complicado, ya que es la mayor responsable de los resultados incongruentes. En una primera instancia, se contempló la posibilidad de que se tratara de un error tipográfico, por lo que se envió una consulta a ANSI señalando la discrepancia detectada. A la fecha, y luego de un tiempo considerable, no hemos recibido respuesta. Por otro lado, en lo referente a la constante de tiempo térmica, ANSI/IEEE 242/86 da la siguiente tabla de donde obtenerla:

Tabla 1: K Factors for Eqs in 8.5.2.4

Cable Size	Air		UG Duct	Direct Buried
	No Cond	In Cond		
< #2	0.33	0.67	1.00	1.25
#2–#4/0	1.00	1.50	2.50	3.00
250 MCM	1.50	2.50	4.00	6.00

mientras que en la deducción aparece la expresión de la constante de tiempo, la cual, utilizando las constantes de calor específico, densidad y resistividad del cobre, toma la siguiente forma:

$$K[h] = 0,0591 \left(\frac{s}{I_N}\right)^2 \cdot \frac{\Delta T_N}{1 + \alpha T_N} \cdot \frac{1 + \alpha T_{max}}{1 + \alpha T_0} \tag{3}$$

Esta expresión es fácil de utilizar y depende de valores simples de conseguir

Resultados

Verificación experimental

El resultado de una verificación experimental se presenta en la figura 3, para la cual se utilizó un cable unipolar de 95 mm^2 de cobre instalado al aire libre, aplicando tres veces la corriente nominal con precarga nula. Se tomó registro de la temperatura accediendo a la superficie conductora del cable mediante un sistema de adquisición de datos y una termocupla tipo T como se muestra en la figura 2.

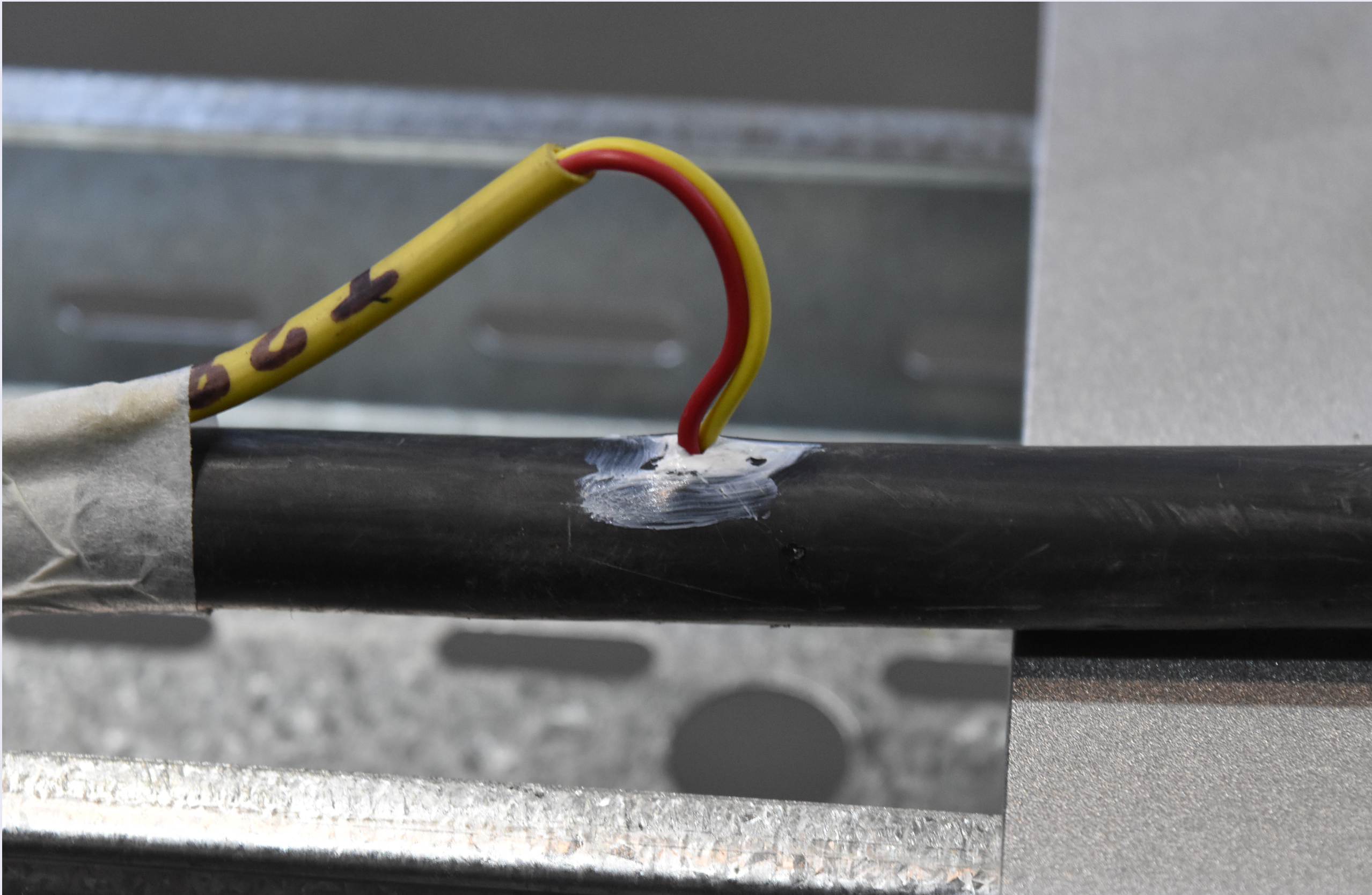


Figura 2: Montaje de la termocupla para la verificación experimental

En línea de trazos se ve la curva teórica y en línea llena la experimental, se tomó como temperatura de emergencia $T_E = 74^\circ\text{C}$, elegida por cuestión de índole práctica y la temperatura ambiente se encontraba en 21 °C.

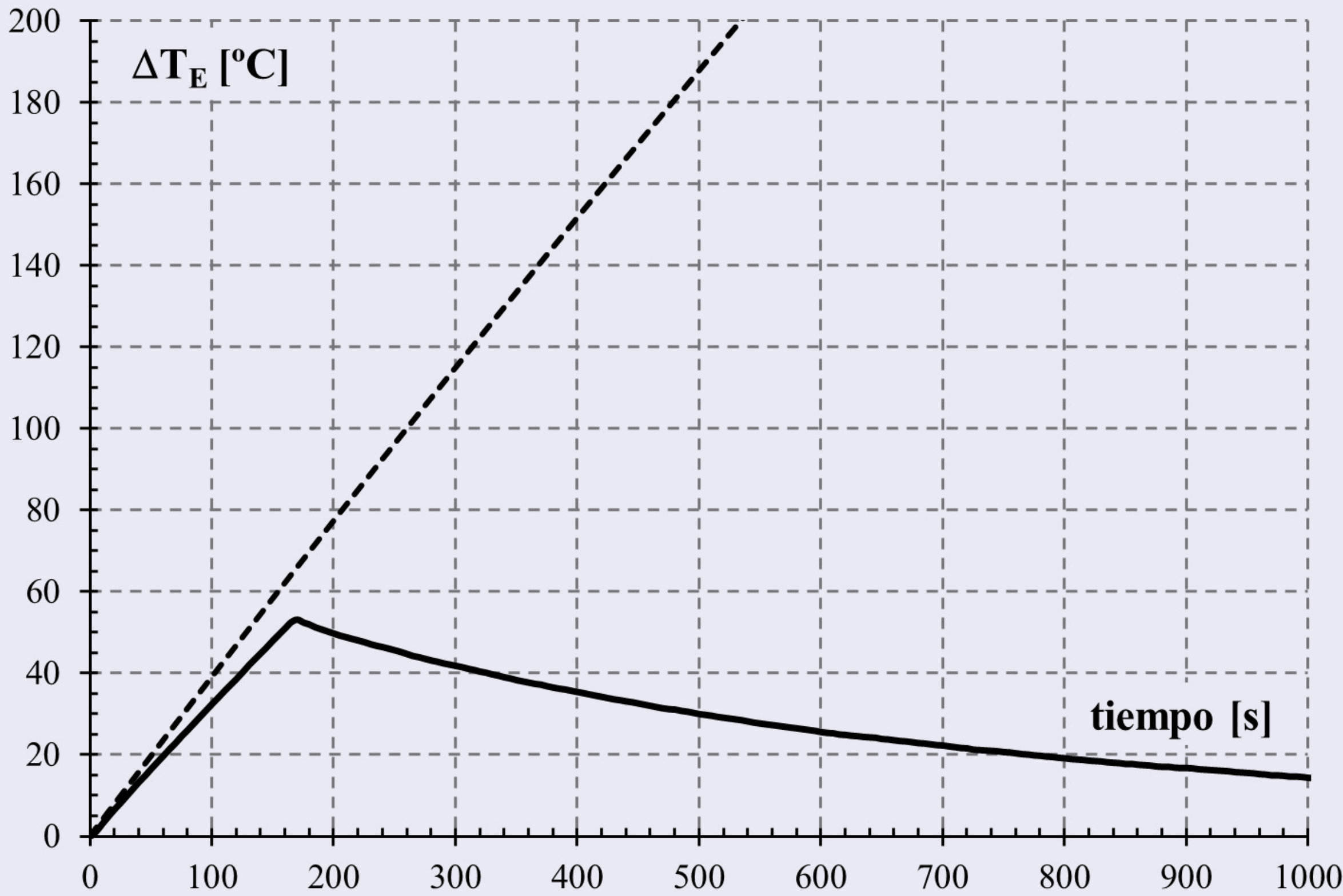


Figura 3: Sobreelevación de temperatura medida

Conclusiones

- En más de una ocasión, por causas diversas, hemos utilizado una expresión matemática obtenida de un libro, norma o publicación, dándola por verdadera basando nuestro proceder en el prestigio de la procedencia. En estos casos, un error de impresión puede pasar inadvertido, por lo que sería conveniente tomar los recaudos necesarios, y mantenernos críticos y pensantes.
- Se demuestra una vez más la importancia de contar con las instalaciones y equipamiento para poder respaldar con mediciones lo presentado.
- Si bien los resultados obtenidos son alentadores, se requiere mayor experimentación, con distintos cables, distintas formas de instalación y con diferentes precargas.

Referencias

- ▣ *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*, IEEE, 1986, also known as the Buff Book. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/42054>
- ▣ *IEEE Buff Book: Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*, IEEE, 2001, revision of IEEE Std 242-1986. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/965035>

Contacto

Página web: <https://leme.ing.unlp.edu.ar/>

