Práctica pautada Nº 1. Física Experimental II

Tiempo de respuesta de un termómetro de mercurio

Profesores:

Dra. Bertuccelli, Daniela

Prof. Garbellini, Olga

Alumnos:

Palermo, Pedro

Alés, Alejandro

Fecha: 07/04/2008

Objetivo:

Determinar el tiempo de respuesta de dos termómetros de mercurio de distinta graduación, a partir de curvas de enfriamiento y o calentamiento de Newton

Introducción:

Cuando en un cuerpo de temperatura (T_O) se pone en contacto con un medio de temperatura distinta, su temperatura no cambia de manera instantánea, sino que llega al equilibrio térmico con el medio de forma paulatina; este cuerpo puede ser el mismo termómetro que usamos para medir la temperatura del medio. Se puede definir el tiempo de respuesta del termómetro como el tiempo característico que tarda en alcanzar la temperatura del medio circundante.

Este tiempo de respuesta se puede determinar a partir de la ley de enfriamiento de Newton, la cual establece que la rapidez de variación de temperatura es proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el medio circundante:

$$\frac{dT}{dt} = k\left(T_f - T\right) \qquad (1)$$

donde k es una constante de proporcionalidad, que depende del medio, del cuerpo y la masa del mismo, y T_f es la temperatura del medio.

Llamando h al coeficiente de transferencia de calor de la superficie en contacto con el ambiente, y designando con A su área efectiva, si llamamos m a la masa del sistema y c su calor específico, entonces en un intérvalo de tiempo dt, el cambio de temperatura dT del sistema será:

$$hA\left(T_f - T\right)dt = mcdT \qquad (2)$$

Definiendo el parámetro:

$$\tau = \frac{mc}{hA} \qquad (3)$$

donde τ es la constante de tiempo de enfriamiento y mide el tiempo de respuesta del sistema. El término mc está referido a la capacidad térmica del sistema (C_t). A la inversa del producto hA se lo suele llamar resistencia térmica del sistema (R_t).

Así τ se podría expresar

$$\tau = R_t C_t \qquad (4)$$

Esto expresa que el sistema de estudio se enfría o calienta a través de la resistencia térmica que depende del material.

Reemplazando en la Ec. (1)

$$\frac{dT}{dt}=\frac{\left(T_f - T\right)}{\tau} \qquad (5)$$

Integrando y utilizando las siguientes condiciones:

$$T(t=0)=T_o$$
$$T(t=\infty)=T_f$$

Se obtiene la solución

$$T(t)=T_f-\left(T_f-T_o\right)e^{-t/\tau} \qquad (6)$$

Elementos utilizados:

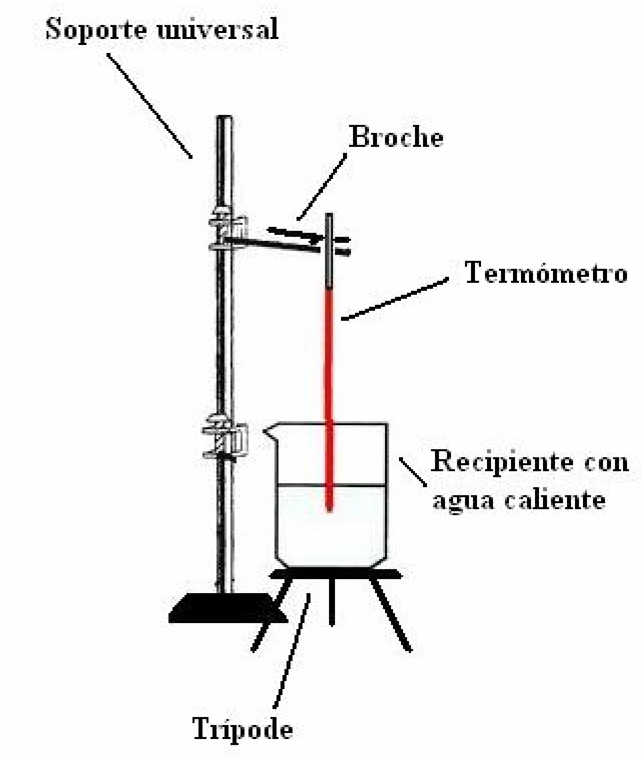
- Termómetro de mercurio graduado de 0 ºC a 100 ºC
- Termómetro de mercurio graduado de 0 ºC a 300 ºC
- Mechero de Bunsen
- Soporte universal
- Trípode
- Tela de amianto
- Recipiente de vidrio

Procedimiento

Experiencia de calentamiento:

Disponiendo de dos termómetros de distinta graduación, uno de 0 °C a 100 °C y otro de 0 °C a 300 °C, se los colocó por turnos en un recipiente de agua caliente. La misma se calentó por un mechero Bunsen, sobre una malla de tela de amianto colocada sobre un trípode. Para sostener los termómetros se utilizó un broche de madera sujeto horizontalmente mediante un juego de nueces y un soporte.

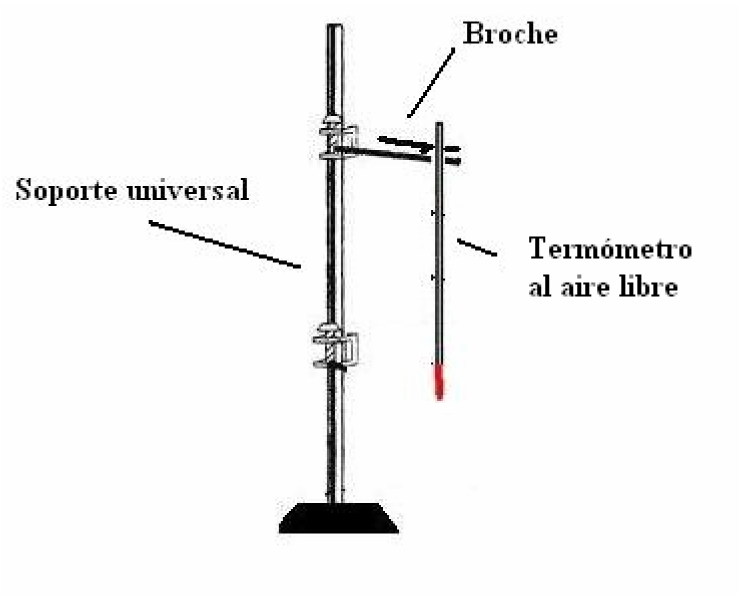
Previamente se había registrado la temperatura ambiente, que fue denominada como T_o . Al sumergir el termómetro, se dio marcha al cronómetro y se tomo como segunda medición la temperatura donde el termómetro se estabilizó, a fin de no cometer un serio error con la toma del tiempo. A partir de ese momento se fueron registrando los tiempos que tardaba el termómetro en aumentar una determinada cantidad de graduaciones.



Experiencia de enfriamiento:

Colocados los termómetros en un recipiente de agua caliente, y dejados el tiempo conveniente para lograr el equilibrio térmico, se registró esta temperatura como T_o . A continuación se los puso en contacto con el ambiente repentinamente, iniciando en este instante el conteo con el cronómetro. En este caso también se esperó a que el termómetro se estabilice, y a partir de allí, registraron los tiempos que demoraba el termómetro en descender una graduación.

A partir de los datos obtenidos, utilizando el programa Origin se obtuvieron las curvas de mejor ajuste.

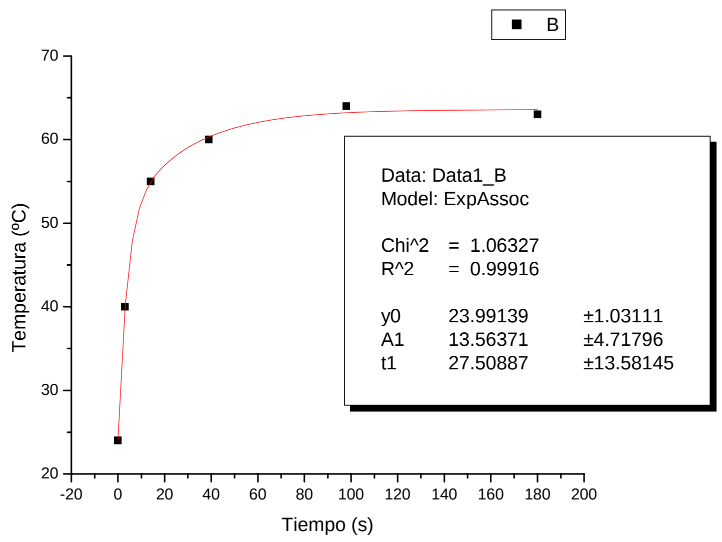


Resultados y análisis de datos:

Tabla 1: Calentamiento del termómetro graduado de 0 ºC a 100 ºC

tiempo (s)	error	temperatura(°C)	error
0	0.01	27	1
3	0.01	40	1
14	0.01	55	1
39	0.01	60	1
98	0.01	64	1
180	0.01	63	1

Por medio del programa Origin, se ajustan los datos con una ecuación exponencial del



tipo $y = y_o + A_1 e^{-x/t_1}$ Figura 1

$A_1 = (14 \pm 5)^o C \qquad t_1 = (28 \pm 14)s$

$y_o = (24 \pm 1)^o C$

donde y_o es la temperatura en el tiempo = 0 seg, A_1 es $(T_f - T_o)$ y t_1 es τ

Como se ve en la figura 1, la curva de calentamiento del termómetro graduado de 0 a 100 ºC se puede ajustar muy bien con una exponencial de primer orden.

<u>Tabla 2</u>: Enfriamiento del termómetro graduado de 0 ºC a 100 ºC

tiempo (s)	error	temperatura(°C)	error
0	0.01	92	1
2	0.01	75	1
9	0.01	70	1
25	0.01	65	1
46	0.01	62	1
81	0.01	55	1
121	0.01	53	1
168	0.01	51	1
218	0.01	50	1

Utilizando el programa Origin, se ajustó con una curva exponencial de segundo orden $y = y_o + A_1 e^{-x/t_1} + A_2 e^{-x/t_2}$, dado que la ecuación exponencial de primer orden, no lograba satisfacer los puntos.

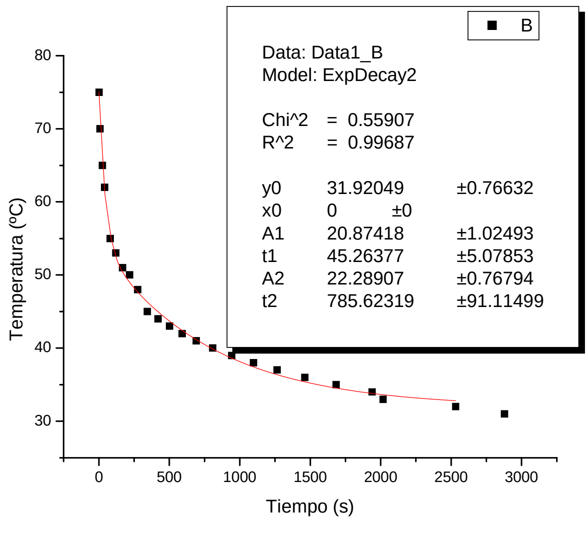


Figura 2

$y_o = (32 \pm 1)^o C \qquad t_1 = (45 \pm 5) \qquad t_2 = (790 \pm 90)$

$A_1 = (21 \pm 1) \qquad A_2 = (22 \pm 1)$

Como se puede ver en la figura 2, la curva de calentamiento del termómetro graduado de 0 a 300 ºC no responde a la ley de enfriamiento de Newton, ya que no se ajusta con una función exponencial de primer orden.

A continuación se muestra el resultado de dividir a la curva anterior en dos partes.

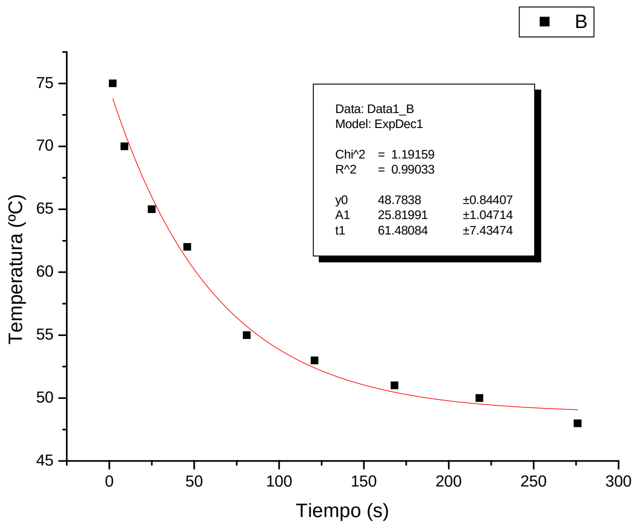


Figura 3

$y_o = (49 \pm 1)^o C$ $\qquad t_1 = (61 \pm 7)s$

$A_1 = (25 \pm 1)^o C$

donde A_1 es $(T_o - T_f)$, y_o es T_f y t_1 es τ

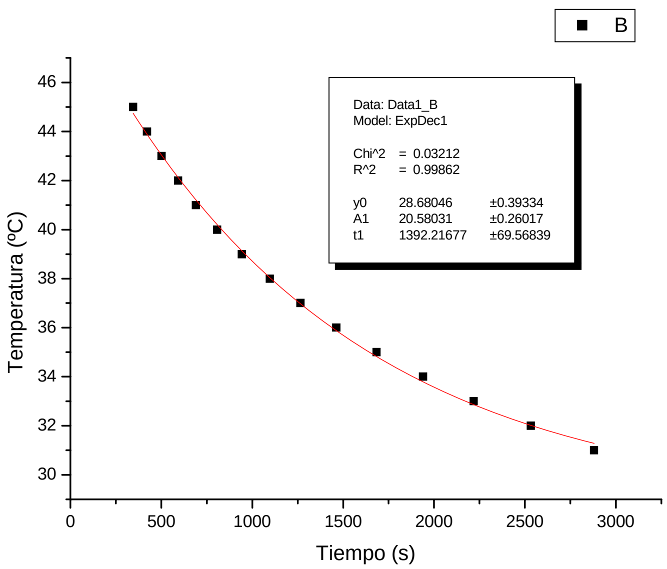


Figura 4

$$y_o = (28{,}7 \pm 0{,}4)^o C \qquad t_1 = (1392 \pm 70)s$$

$$A_1 = (20{,}6 \pm 0{,}3)^o C$$

donde A_1 es $(T_o - T_f)$, y_o es T_f y t_1 es τ

Como se puede ver en las figuras 3 y 4, las curvas resultantes se pueden ajustar aceptablemente bien con una exponencial de la forma $y = y_o + A_1 e^{-x/t_1}$ lo que indica que responden a la ley de enfriamiento de Newton.

<u>Tabla 3</u>: Calentamiento del termómetro graduado de 0 ºC a 300 °C

tiempo (s)	error	temperatura (°C)	error
0	0.01	21	2
28	0.01	28	2
86	0.01	60	2
170	0.01	62	2
285	0.01	64	2
437	0.01	66	2
622	0.01	68	2
844	0.01	70	2
1089	0.01	72	2

Por medio del programa Origin, se ajustan los datos con una ecuación exponencial del tipo:

$$y = y_o + A_1\left(1 - e^{-x/t_1}\right) + A_2\left(1 - e^{-x/t_2}\right)$$

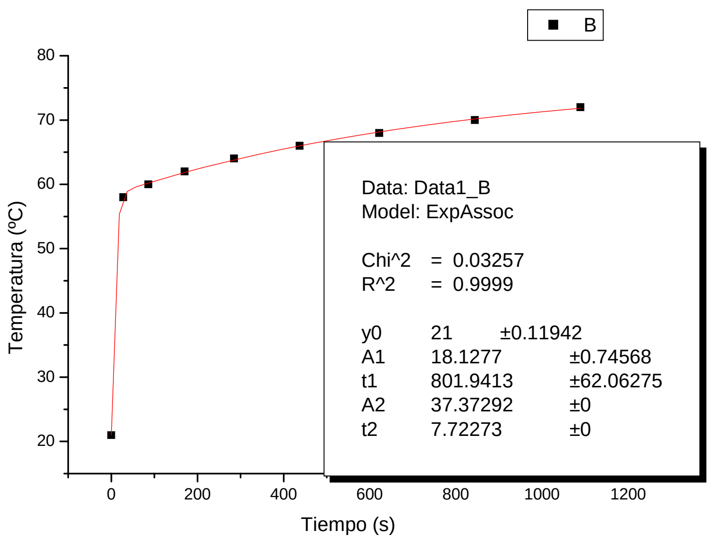


Figura 5

$y_o = (21{,}0 \pm 0{,}1)^o C \qquad t_1 = (800 \pm 60) \qquad t_2 = (8)$

$A_1 = (18 \pm 1) \qquad A_2 = (37)$

Como se puede ver en la figura 5, la curva de calentamiento del termómetro graduado de 0 a 300 ºC no responde a la ley de enfriamiento de Newton, ya que no se ajusta con una función exponencial de primer orden.

En la siguiente figura se muestra la misma curva pero quitando el primer punto.

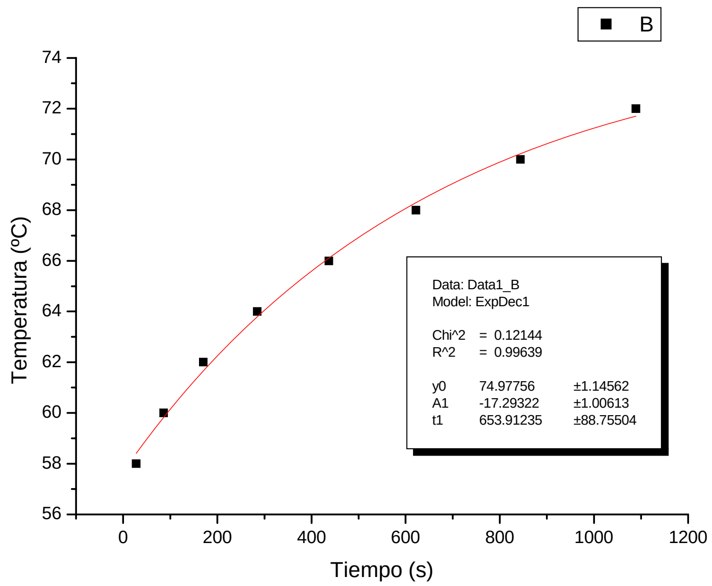


Figura 6

$y_o = (75 \pm 1)^o C \qquad t_1 = (650 \pm 90)s$

$A_1 = (-17 \pm 1)^o C$

donde A_1 es $(T_o - T_f)$, y_o es T_f y t_1 es τ

La curva resultante se puede ajustar con una exponencial de la forma $y = y_o + A_1 e^{-x/t_1}$ lo que indica que responde a la ley de enfriamiento de Newton.

<u>Tabla 4</u>: Enfriamiento del termómetro graduado de 0 ºC a 300 °C

tiempo (s)	error	temperatura(°C)	error
16	0.01	60	2
45	0.01	56	2
82	0.01	52	2
125	0.01	50	2
177	0.01	48	2
261	0.01	40	2
359	0.01	38	2

470	0.01	36	2
595	0.01	34	2
740	0.01	32	2
905	0.01	30	2
1106	0.01	28	2
1355	0.01	26	2
1710	0.01	24	2

Aquí también se graficó con el Origin y se ajustó con la exponencial $y = y_o + A_1 e^{-x/t_1}$

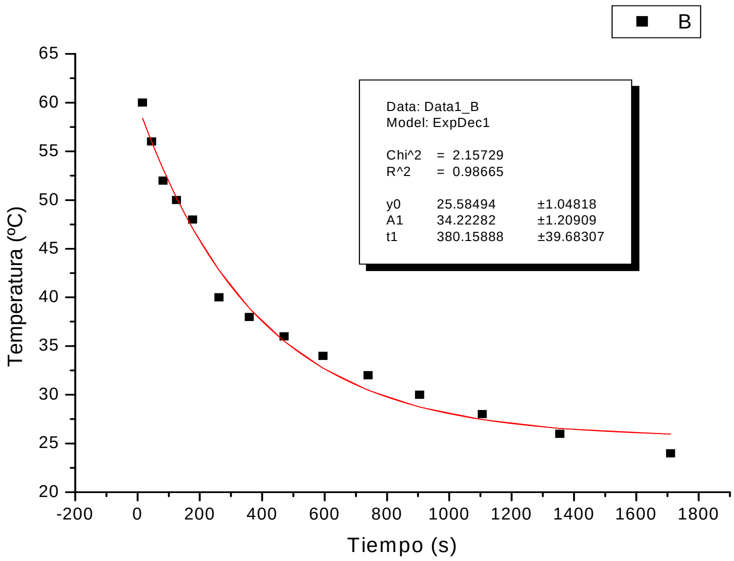


Figura 7

$y_o = (26 \pm 1)^o C$ $\qquad t_1 = (380 \pm 40)s$

$A_1 = (34 \pm 1)$

donde y_o es T_f , A_1 es $(T_o - T_f)$ y t_1 es τ

En la figura 7 se ve que la curva de enfriamiento del termómetro graduado de 0 a 300 ºC se puede ajustar aceptablemente bien con una exponencial de primer orden. Sin embargo se aprecia un salto entre el quinto y sexto punto de la gráfica. Por esta razón se procedió a dividir a la curva en dos partes:

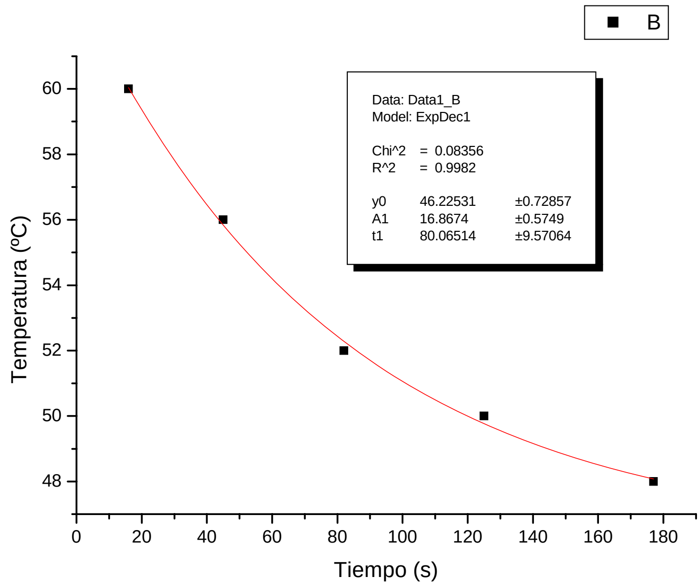


Figura 8

$y_o = (46{,}2 \pm 0{,}7)^o C$ $\qquad t_1 = (80 \pm 10)s$

$A_1 = (16{,}9 \pm 0{,}6)$

donde y_o es T_f, A_1 es $(T_o - T_f)$ y t_1 es τ

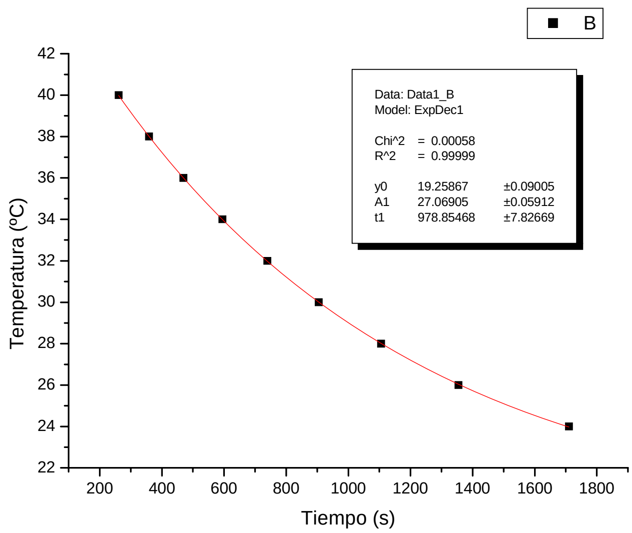


Figura 9

$y_o = (19{,}26 \pm 0{,}09)^o C$ $\qquad t_1 = (979 \pm 9)s$

$A_1 = (27{,}07 \pm 0{,}06)$

donde y_o es T_f , A_1 es $\left(T_o - T_f\right)$ y t_1 es τ

Como se puede ver en las figuras 8 y 9, las curvas resultantes se pueden ajustar bastante bien con una exponencial de la forma $y = y_o + A_1 e^{-x/t_1}$ lo que indica que responden a la ley de enfriamiento de Newton.

El tiempo de respuesta para el calentamiento del termómetro de 0 a 100 (del aire al agua caliente) fue de aproximadamente 27 segundos. Si bien la curva de calentamiento correspondiente a este termómetro se puede ajustar con una exponencial de primer orden, esta no responde exactamente a la ley de enfriamiento de Newton, ya que el parámetro A_1 no coincide con la diferencia de temperatura: final – inicial del termómetro.

En cuanto al tiempo de respuesta para el calentamiento del termómetro de 0 a 300 (del aire al agua caliente) fue de $(650 \pm 90)s$ tomando en cuenta la curva de la figura 6, la cual deja sin graficar el primer punto de la curva real obtenida. Se puede decir que esta curva responde aceptablemente bien a la ley de enfriamiento de Newton porque, además de ser una exponencial creciente de primer orden los parámetros y_o y A_1 coinciden suficientemente bien con T_f y $\left(T_o - T_f\right)$ respectivamente.

Las curvas de enfriamiento, tanto para el termómetro graduado de 0 a 100 ªC como para el de 0 a 300 ºC, se dividieron en dos partes, las cuales se ajustan bastante bien con exponenciales de primer orden. Esto podría indicar que cada enfriamiento se comportó en realidad como dos enfriamientos de Newton simultáneos.

Conclusión:

En primer lugar, es importante señalar que el arreglo experimental pudo haber generado un error importante, dada las dificultades que se presentaron a la hora de tomar los tiempos intermedios a medida que los termómetros marcaban las diferencias de temperatura. Esto se hace evidente a la hora de realizar el ajuste de las curvas, ya que, si bien estas responden a la ley de enfriamiento de Newton en el sentido que forman curvas exponenciales de primer orden, los parámetros no coincidían con los valores teóricos o bien hubo que sacar algunos puntos obtenidos para realizar mejor el ajuste.

La razón de estas diferencias también podría radicar en que esta ley se basa en un modelo ideal y no tiene en cuentas muchas variables que son de importancia en la experiencia, como por ejemplo pérdidas de calor por convección o radiación.

En el caso particular de los enfriamientos (de agua a aire), los cuales se comportaron como dos enfriamientos simultáneos, quizás tuvo influencia que los termómetros estuvieran mojados al comienzo de dicha experiencia y se fueran secando a medida que transcurría el tiempo. De esta manera la experiencia de enfriamiento podría separarse en dos fases: el enfriamiento mientras el termómetro está mojado, en la cual el calor es conducido del termómetro a la película de agua que lo recubre y de ésta al aire, y el enfriamiento una vez que el termómetro está seco, en la cual el calor es conducido directamente del termómetro al aire.

Para reducir el error experimental sería conveniente tomar la temperatura que marca el termómetro a intervalos regulares de tiempo, y no tomar el tiempo cada vez que el termómetro disminuye o aumenta un determinado número de graduaciones. Además, también convendría dejar más tiempo los termómetros en contacto con el medio hasta estar seguros de que se ha alcanzado el equilibrio térmico.

Bibliografía

* Física Re-Creativa, S. Gil y E. Rodríguez

Anexo

Para comprobar si había tenido influencia que los termómetros estuvieran mojados al comienzo de la experiencia de enfriamiento y se fueran secando a medida que transcurría el tiempo, se repitió dicha experiencia con el termómetro graduado de 0 a 300 ºC, pero esta vez secándolo con una servilleta de papel al momento de retirarlo del recipiente de agua caliente.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

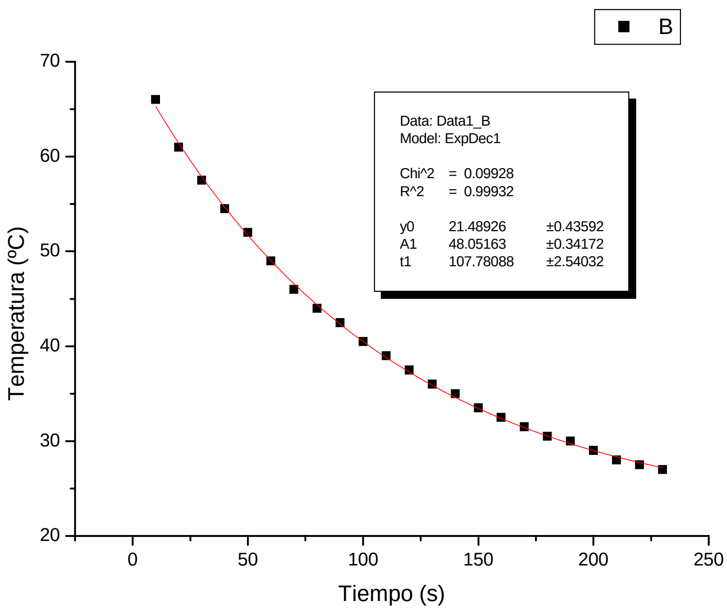


Figura 10

$y_o = (21{,}5 \pm 0{,}4)^o C$ $\qquad t_1 = (107 \pm 3)s$

$A_1 = (48{,}1 \pm 0{,}3)$

donde y_o es T_f, A_1 es $(T_o - T_f)$ y t_1 es τ

Como se puede ver en el gráfico anterior, la curva obtenida ajusta muy bien con una exponencial de primer orden, y es claro que responde a la ley de enfriamiento de Newton. A partir de esto se podría concluir que sí tenía influencia la película de agua que recubría los termómetros al comienzo de la experiencia de enfriamiento.