

Comparación entre curvas de calentamiento teóricas y experimentales

Práctica no pautada de Laboratorio, Física experimental II, 2009

Larregain, Pedro

Machado, Alejandro

pedrolarregain@yahoo.com

machado.alejandro@yahoo.com

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, UNICEN

Objetivos

Determinación de la pérdida de energía en el calentamiento de agua por la ley de enfriamiento de Newton.
Comparación de las curvas de calentamiento obtenidas experimentalmente.

Introducción

La transferencia de calor está relacionada con los cuerpos calientes y fríos llamados; fuente y receptor, en donde la misma, tiene sus propios mecanismos (conducción, convección y radiación) y cada uno de ellos cuenta con sus peculiaridades. La transferencia de calor es importante en los procesos, porque es un tipo de energía que se encuentra en tránsito, debido a una diferencia de temperaturas (gradiente), y por tanto existe la posibilidad de presentarse el enfriamiento, sin embargo esta energía en lugar de perderse sin ningún uso es susceptible de transformarse en energía mecánica por ejemplo; para producir trabajo, generar vapor, calentar una corriente fría, etc. En virtud de lo anterior es importante hacer una introducción al conocimiento de los procesos de transferencia de calor a través de la determinación experimental de la ecuación empírica que relaciona la temperatura de enfriamiento de una cantidad de sustancia con respecto al medio.

La ley de enfriamiento de Newton enuncia que, cuando la diferencia de temperaturas entre un cuerpo y su medio ambiente no es demasiado grande, el calor transferido por unidad de tiempo hacia el cuerpo o desde el cuerpo por conducción, convección y radiación, es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre el cuerpo y dicho medio externo, siempre y cuando este último mantenga constante su temperatura durante el proceso de enfriamiento.

La genialidad de Newton se pone de manifiesto nuevamente cuando utilizando un horno de carbón de una pequeña cocina, realizó un sencillo experimento: calentó al rojo vivo un bloque de hierro, al retirarlo lo colocó en un lugar frío y observó cómo se enfriaba el bloque de metal en el tiempo. Sus conjeturas sobre el ritmo al cual se enfriaba el bloque dieron lugar a lo que hoy conocemos con el nombre de ley enfriamiento Newton. [1]

Esta ley describe que la razón de pérdida de calor de un cuerpo es proporcional a la diferencia entre la temperatura del cuerpo y el medio ambiente que lo circunda. Se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{dQ}{dt} = hA(T - T_A) \quad (1)$$

Donde h es el coeficiente de intercambio de calor, (en este caso es considerado global por agrupar la transferencia de calor por convección, conducción y radiación), y A el área superficial del cuerpo que se encuentra expuesta al medio ambiente.

Si la temperatura del cuerpo es mayor a la ambiental, entonces deberá experimentar una pérdida de calor, la cual será proporcional a la diferencia de temperaturas, podemos expresar esto en forma diferencial como:

$$dQ = -m.c.dT \quad (2)$$

Donde m es la masa del cuerpo y c su calor específico, (el producto mc es conocido como C , que es la capacidad calorífica del sistema), el signo menos indica una pérdida calorífica. Podemos combinar las ecuaciones (1) y (2) en una forma simplificada:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_A) \quad (3)$$

Donde k es una constante de proporcionalidad conocida como parámetro de enfriamiento o conductividad térmica ($k=ha/mc$) y T_A es la temperatura ambiente, que se supone siempre constante. Resolviendo (3), se puede expresar que $T = T_A + \Delta T.e^{\frac{-t}{\tau}}$ (3b)

En el caso en el que el sistema tenga una fuente de energía (constante) que le proporcione calor, se expresa de manera cuantitativa de la siguiente manera:

$$P = mc \frac{dT}{dt} \quad (4)$$

Expresando la temperatura en función del tiempo, se obtiene la siguiente ecuación:

$$T = T_a + \frac{P}{mc}t \quad (5)$$

Es decir que la temperatura varía en forma lineal con el tiempo

Si hay pérdida de energía debido al enfriamiento de Newton, ésta es transferida a la atmósfera con lo que la ecuación de balance de energía viene dada por:

$$P = mc \frac{dT}{dt} + hA(T - T_a) \quad (6)$$

Esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P}{mc} - \frac{hA}{mc}(T - T_a) \quad (7)$$

La solución de esta ecuación diferencial para un cuerpo que recibe calor de una fuente de energía y esta afectado por la “ley de enfriamiento de Newton” variando desde una temperatura T_a hasta una temperatura T , obtenemos la temperatura del cuerpo en función del tiempo [2]:

$$T = T_a + \frac{P}{hA} \left[1 - e^{-\frac{hA}{mc}t} \right] \quad (8)$$

En esta ecuación se observa que el calor suministrado al sistema genera un aumento exponencial en la temperatura del mismo.

Procedimiento experimental

Se procedió a calentar una cierta medida de agua (aproximadamente 0.352 kg) en un recipiente de vidrio de 400 ml de capacidad, el mismo se encontraba tapado con un material considerado adiabático para restringir la pérdida de masa por evaporación. Luego de algunas pruebas, se decidió utilizar para esta experiencia dos métodos de calentamiento distintos, por un lado un mechero a gas para obtener altas velocidades de calentamiento, y por otro una resistencia conocida conectada a una fuente de tensión variable para brindar distintas potencias fáciles de determinar. Para cada una de las mediciones, se utilizó el mismo volumen de agua que en la primera experiencia y se colocó una termocupla conectada a una placa adquisidora en la parte media de ese volumen.

Las dos primeras mediciones fueron realizadas utilizando un mechero en potencia media y baja.

Como se verá en las gráficas de resultados, también se realizó una medición con la potencia máxima del mechero, pero por haber sido esta una prueba anterior, la misma contaba con un volumen de agua diferente del resto el cual no fue medido y su recipiente era de 600ml de capacidad.

Luego se realizó el mismo procedimiento con un resistor eléctrico que contaba con una resistencia de 55 ohm. Se llevaron a cabo dos mediciones, una aplicando una tensión de 50 Volts obteniendo una potencia de 45,45 Watts y otra aplicando una tensión de 10 Volts obteniendo una potencia de 1.8 Watts.

En el caso de las resistencias, después de haber llegado a la temperatura máxima, se procedió a desconectar la fuente de energía y se midió el enfriamiento del sistema.

Para cada una de las experiencias, se controló la temperatura ambiente y por haber registrado variaciones de la misma menores al valor de incertidumbre del instrumento utilizado (termómetro de mercurio $\pm 1^\circ\text{C}$) se considera a la temperatura ambiente de cada una de las experiencias como constante.

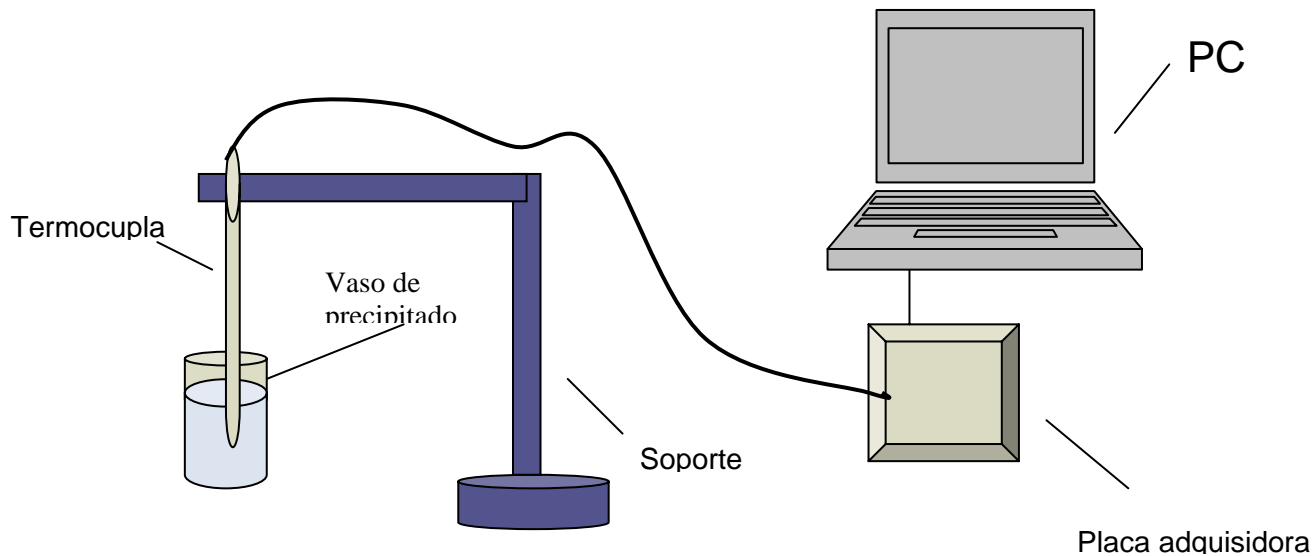
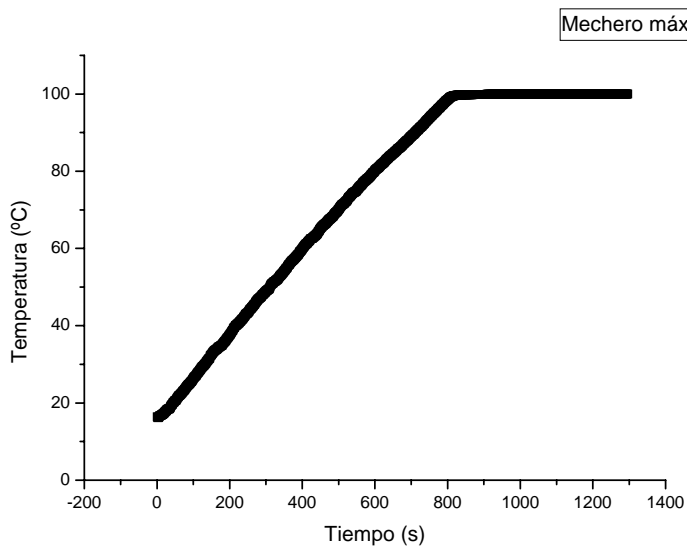


Fig. 1: Arreglo experimental

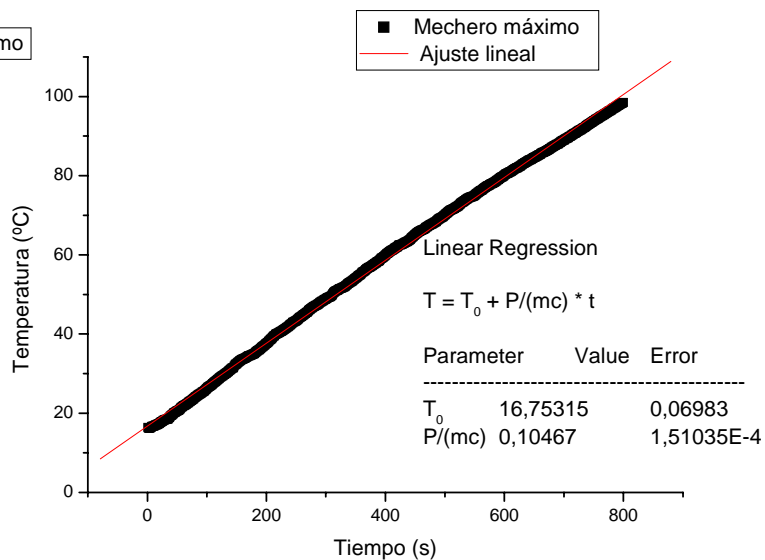
Resultados y análisis

Curvas de calentamiento obtenidas experimentalmente

Mechero - Potencia máxima



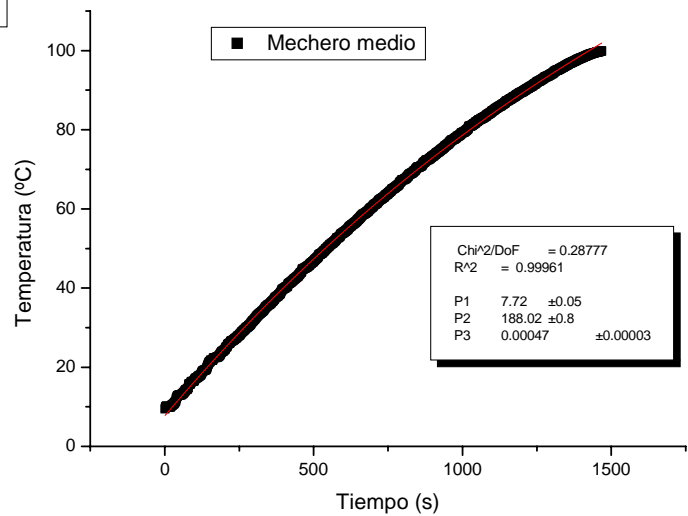
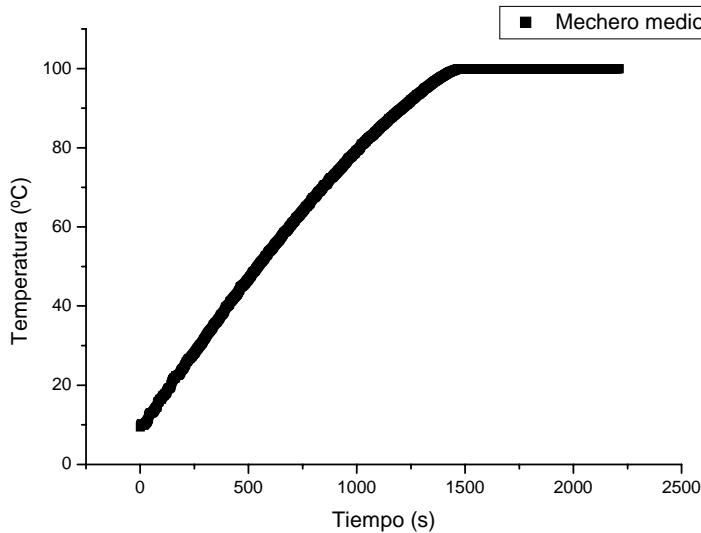
Gráfica 1



Gráfica 2

Estas gráficas muestran el comportamiento del cambio de temperatura en función del tiempo cuando se le aplica una potencia considerada alta para una determinada cantidad de masa. En la gráfica 1, se ve una meseta en la cual la temperatura no varía con el tiempo, la misma se debe al cambio de fase del agua. Como se puede observar en la gráfica 2, la curva de calentamiento se ajusta a una recta de acuerdo a la ecuación (5).

Mechero – Potencia media



En la Gráfica 3 se puede observar que el ajuste de la variación de temperatura en función del tiempo ya no es lineal sino que corresponde a la siguiente función exponencial:

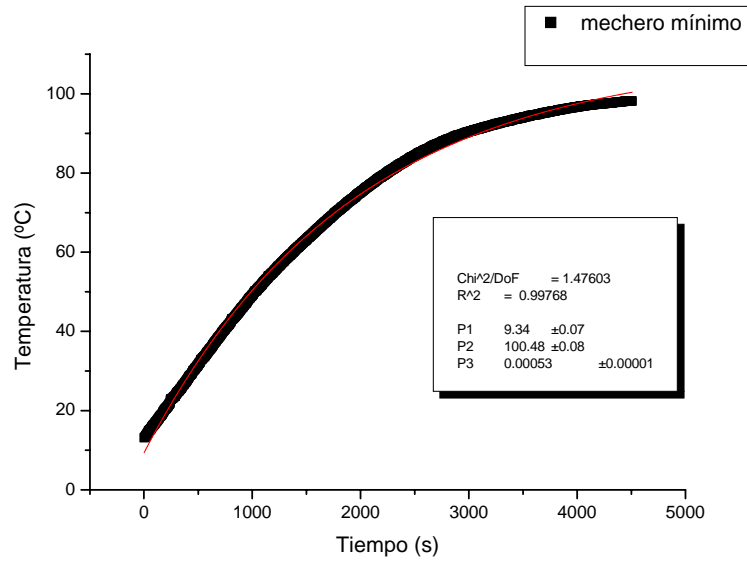
$$Y = P1 + P2 \cdot (1 - e^{-P3 \cdot t}) \quad (9)$$

En donde

$$P1 = T_a \qquad P2 = \frac{P}{hA} \qquad P3 = \frac{hA}{mc}$$

Lo que nos deja con la ecuación $T = T_a + \frac{P}{hA} \left[1 - e^{-\frac{hA}{C}t} \right]$, mostrando la misma la temperatura obtenida bajo el calentamiento por parte de una fuente y contando con una cierta pérdida ocasionada por la ley de enfriamiento de Newton.

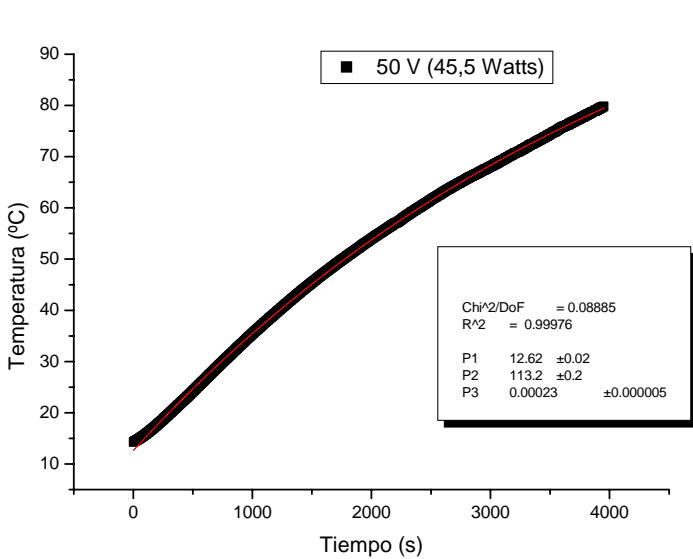
Mechero - Potencia mínima



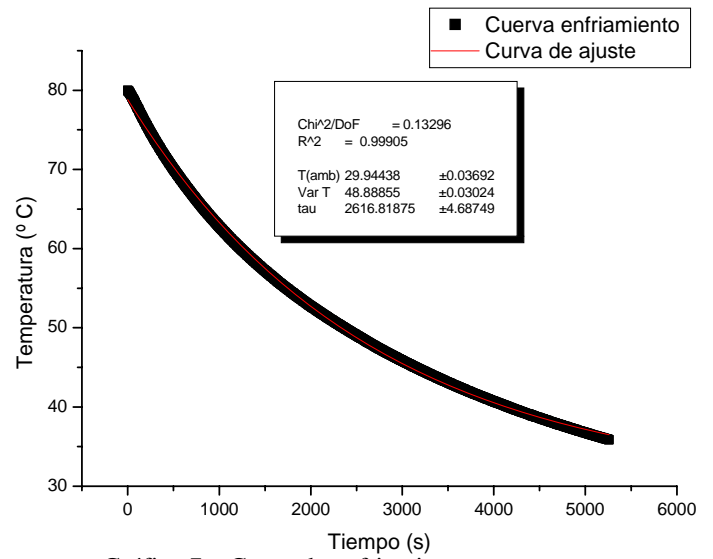
Gráfica 5

La gráfica obtenida muestra un ajuste que también corresponde al de la ecuación (8).

Resistor – 45,45 Watts

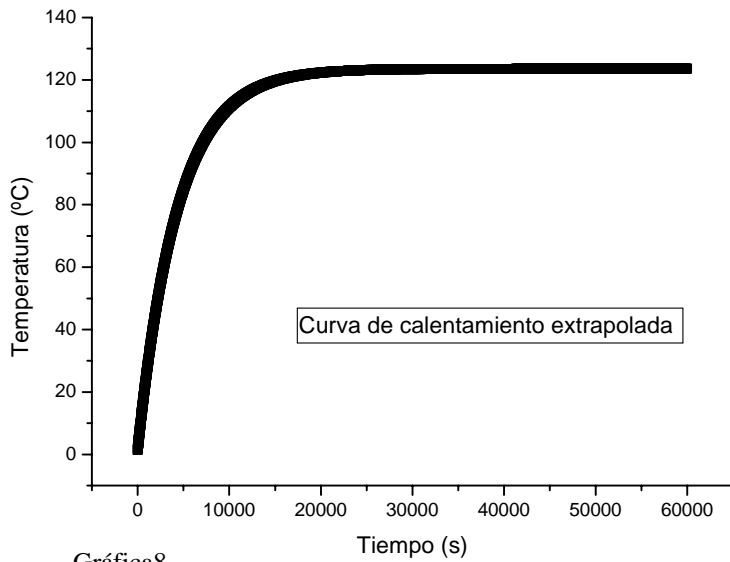


Gráfica 6- Curva de calentamiento



Gráfica 7 – Curva de enfriamiento

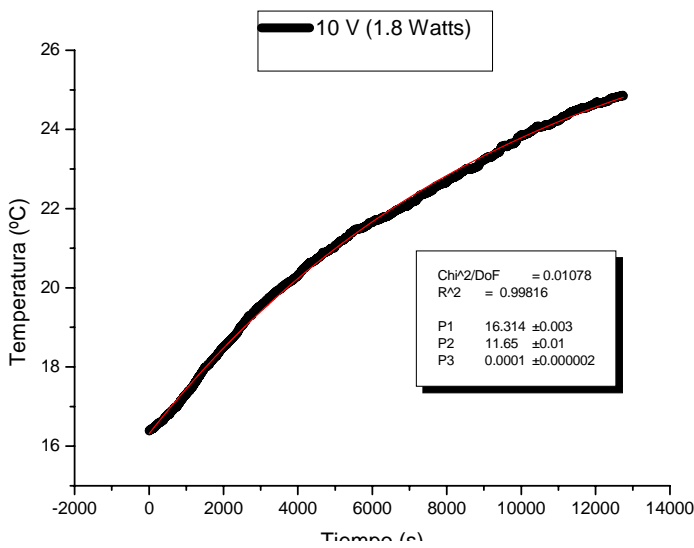
En la gráfica 6 también se realizó un ajuste que corresponde a la ecuación (8). En la gráfica 7 se observa el enfriamiento del sistema, ajustándose el mismo a la ecuación (3b).



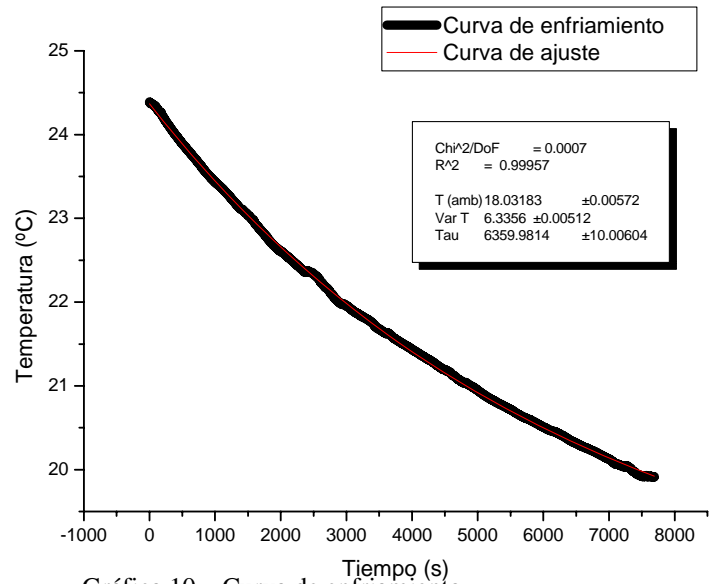
En la gráfica 8 se observa la curva de calentamiento extrapolada siguiendo la función de ajuste (8) con los parámetros obtenidos de la misma.

Gráfica8

Resistor – 1.8 Watts

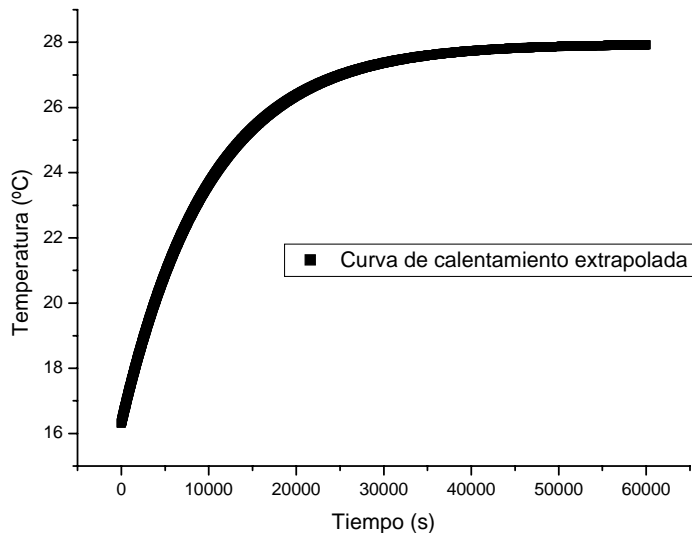


Gráfica 9 – Curva de calentamiento



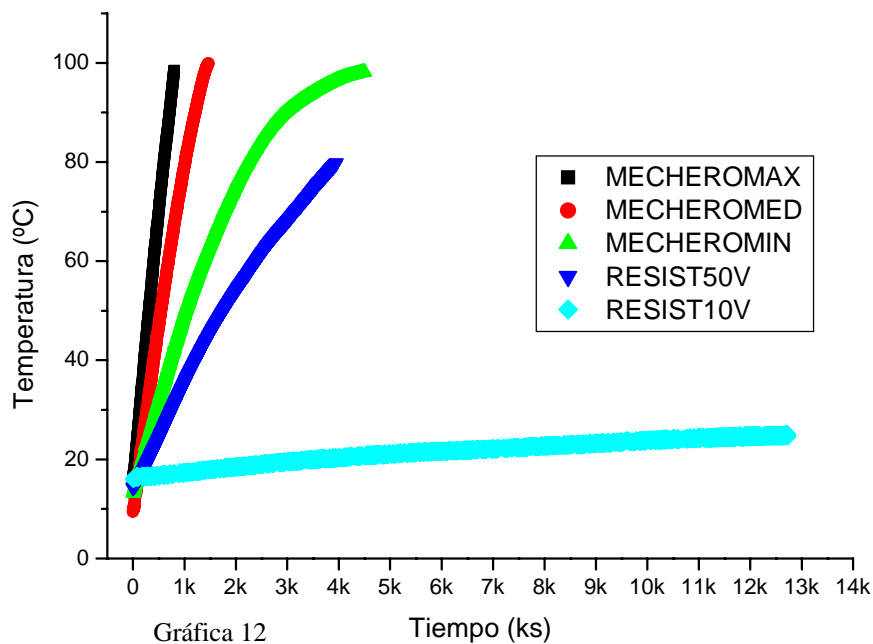
Gráfica 10 – Curva de enfriamiento

En la gráfica 9 puede observarse que el período de tiempo transcurrido es muy grande y que la variación de temperatura es muy pequeña, esto es debido a la baja potencia entregada al sistema. De todas maneras, el ajuste de esta curva también corresponde a la ecuación (8). En la gráfica 10 se observa la curva de enfriamiento del sistema con su curva de ajuste que corresponde a la ecuación (3b).



Gráfica 11

Comparación de curvas de calentamiento



Gráfica 12

Tiempo (ks)

En la gráfica 12 se comparan las curvas de calentamiento obtenidas bajo distintas condiciones pudiendo observarse distintas velocidades de calentamiento en cada una de ellas.

Tabla de resultados

<u>Curva de calentamiento</u>	<u>Temp Amb (°C)</u>	<u>Temp final (°C)</u>	<u>Temp Inicia 1(°C)</u>	<u>ΔT</u>	<u>Δt</u>	<u>Velocidad promedio de calentamiento (°C/s)</u>	<u>1/ζ (1/s)</u>	<u>h=(KJ/KG*Kel *m2*s)</u>	<u>C (KJ/Kg*Kelvi)</u>	<u>P/C=d T/dt teórico</u>	<u>Velocidad promedio de enfriamiento ΔT/ Δt</u>
<u>Mechero máximo</u>	22	99	16	83	800	0,1038					
<u>Mechero medio</u>	16	99	9	90	1468	0,0613	0,00047	35,6584	1653,94		
<u>Mechero mínimo</u>	16	98	13	85	4507	0,0189	0,00053	40,2106	1653,94		
<u>Resistencia 50 V (45,45W)</u>	16	80	14	66	3951	0,0167	0,00023	18,4175	1745,65	0,0260	0.0084
<u>Resistencia 10 V (1,8W)</u>	18	25	16	9	12745	0,0007	0,0001	7,1662	1562,23	0,0012	0.00058

En la tabla de resultados, se muestran los valores del coeficiente h de transmisión de calor de cada una de las experiencias realizadas salvo la del mechero a máxima potencia ya que la misma contaba con una capacidad calorífica C distinta al resto. Vale aclarar que los valores de h de los resistores fueron obtenidos despejando

$$\text{el mismo del parámetro } P2 = \frac{P}{hA} \text{ de la ecuación } Y = P1 + P2.(1 - e^{-P3.t}) \quad (9)$$

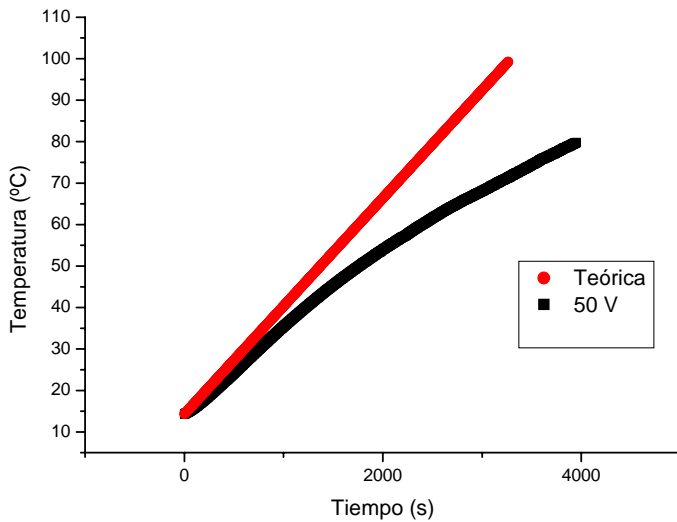
Una vez obtenido el valor de h , para el caso de potencia conocida, se despejó el valor de C del parámetro

$$P3 = \frac{hA}{mc} \text{ de la ecuación (9). Por utilizar la misma masa en las experiencias en las que se calentó la misma}$$

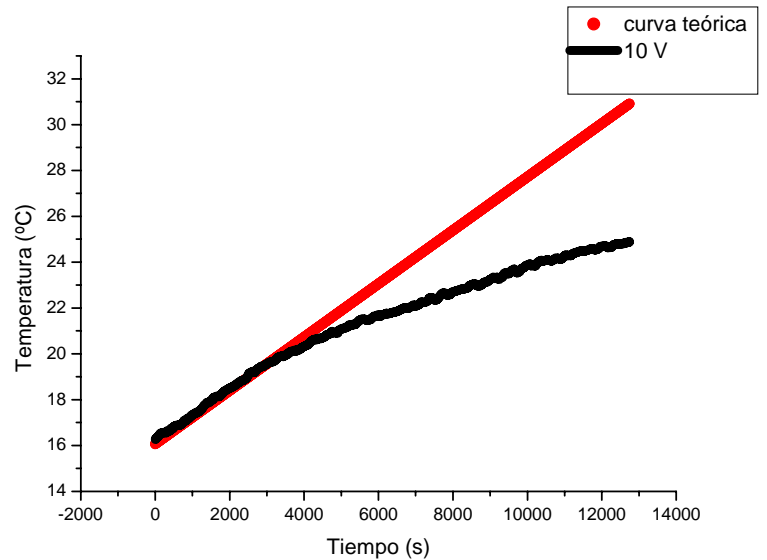
agua con mechero, se promedió el valor de C (1653,94 (KJ/Kg*Kelvi) obtenido de las experiencias con resistores para luego despejar los valores de h de las curvas de los mecheros.

En las gráficas 8 y 11, luego de extrapolar los parámetros utilizando la ecuación de ajuste se puede observar el comportamiento de la temperatura del sistema para un tiempo bastante más extenso, en las mismas se destacan las mesetas alcanzadas que muestran un equilibrio entre el calor otorgado por la fuente y la energía perdida por el sistema por la ley de Newton, es decir, todo el calor ganado es transmitido al ambiente siguiendo lo establecido por esta ley. Es necesario aclarar que en la gráfica 8 se observan valores de temperatura mayores a los 100 ° C, esto es debido a la extrapolación, que muestra una supuesta meseta para los parámetros existentes que alcanzaría esos valores, cuando en realidad, debido al cambio de fase del agua, la temperatura se mantiene constante aproximadamente a los 100 ° C.

Comparación de las velocidades de calentamiento teóricas – experimentales



Gráfica 13



Gráfica 14

En las gráficas 13 y 14 puede observarse la comparación entre la curva de calentamiento real obtenida de la experiencia y la teórica obtenida de la ecuación $P = mc \frac{dT}{dt}$ (4) en la cual no se considera la pérdida de

energía por la ley de enfriamiento de Newton sino que se supone que toda la potencia suministrada (P) es utilizada para calentar el sistema (mc), obteniendo de esta manera, una velocidad de calentamiento teórica:

$$\frac{P}{mc} = \frac{dT}{dt} \quad (10)$$

Comparando los valores obtenidos de la velocidad de calentamiento de las curvas experimentales con los valores teóricos, se puede observar una diferencia en la velocidad promedio de calentamiento, la misma se muestra en la siguiente tabla

Potencia entregada (watts)	Velocidad de calentamiento teórica (°C/s)	Velocidad de calentamiento experimental (°C/s)	$(vel_{cal\ ex} - vel_{cal\ teo})$ (°C/s)	Velocidad de enfriamiento (°C/s)	Potencia efectiva (watts)
45.45	0.026	0.0167	0.0093	0.0084	29.19 (64.23%)
1.8	0.0012	0.0007	0.0005	0.00058	1.05 (58.33%)

Comparando la velocidad de calentamiento teórica con la experimental, se puede observar que la última es la velocidad efectiva la cual es un porcentaje conocido de la primera. Mediante una regla de tres simple se obtuvo la potencia efectiva de las experiencias.

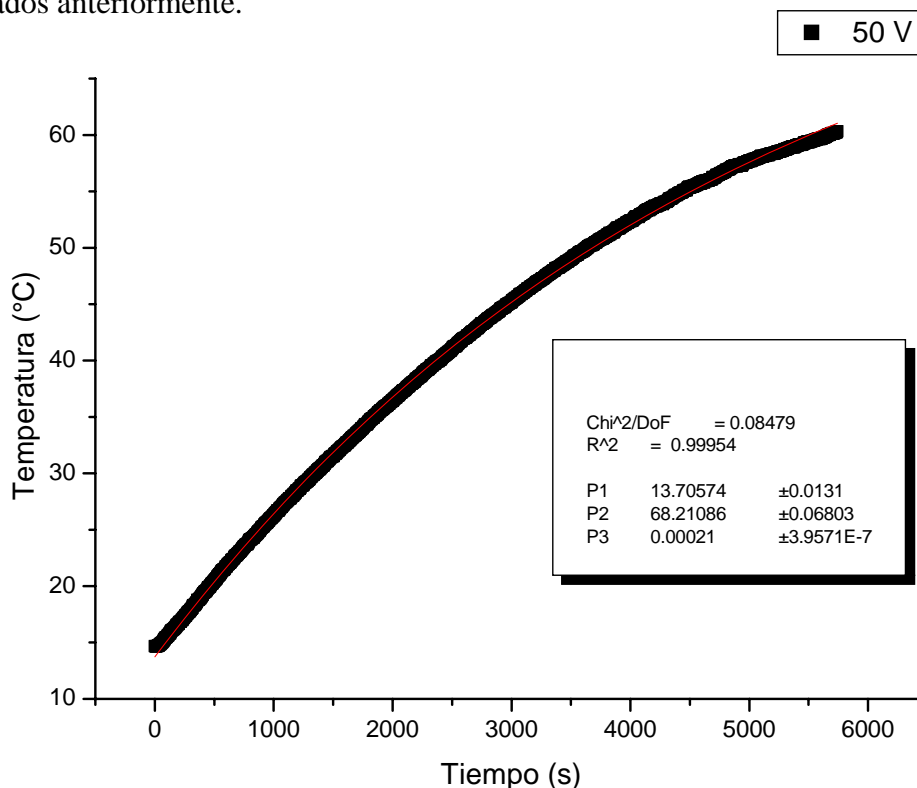
Conclusión

La diferencia obtenida en las velocidades de calentamiento teórica y experimental es atribuida a la pérdida de energía producida por la ley de enfriamiento de Newton, o sea el calor que se transfiere a la atmósfera. En ambos casos, estas diferencias son muy próximas a las velocidades de enfriamiento obtenidas de la ecuación de ajuste resultante del proceso de enfriamiento (sin fuente externa), lo que corrobora que la pérdida de energía que tiene lugar en el calentamiento se debe a la Ley de Newton.

Puede observarse que para una potencia mayor, la diferencia en la velocidad de calentamiento teórica y experimental es proporcionalmente menor, lo que determina que cuanto más grande es la potencia la curva que se obtiene se acerca más a la curva de calentamiento teórica.

Anexo

Luego de terminadas las experiencias, se realizó una prueba con el mismo método agregando un agitador para lograr mantener homogénea la temperatura en todo el recipiente y observar si la velocidad de calentamiento era distinta a las que no presentaban un elemento que creara convección forzada. En esta experiencia se utilizó el mismo recipiente que en las anteriores y un voltaje de 50 V, pero la resistencia utilizada era desconocida, por lo que no se conocía su potencia y no se procedió a realizar los análisis efectuados anteriormente.



En la gráfica se observa la curva de calentamiento del sistema junto con sus parámetros luego de un ajuste

con la función $T = T_a + \frac{P}{hA} \left[1 - e^{-\frac{hA}{mc}t} \right]$. La misma muestra que existe enfriamiento por la Ley de Newton.

Trabajo a futuro

- Intentar deducir de los resultados obtenidos las diferencias entre las curvas experimentales y teóricas para poder cuantificar las pérdidas de energía ocasionadas por la radiación y por la convección.
- Aplicar potencias (conocidas) mayores a la utilizadas para obtener experimentalmente curvas mas próximas a las teóricas.

Bibliografía

- [1] Física, Tipler, Volumen 1 Capítulo 20 “Propiedades y procesos térmicos”
- [2] Física, Sears y Zemansky 11va edición, Capítulo 17 “Temperatura y calor”