



Secado de PET contrastando hornos de microondas y eléctrico

PET drying contrasting microwave and electric ovens

Cosme Zamorano Romero¹ y Joaquín Palacios Alquisira²

Recepción: 22/08/2022

Aceptación: 30/09/2022

Resumen

El objetivo de este trabajo consistirá en revisar conceptos termodinámicos como la Primera Ley de la Termodinámica y calor, y cómo pueden aplicarse en el cálculo de la energía necesaria para el secado de un material humedo. Se desarrolla una comparación, entre la energía necesaria para disminuir la humedad de hojuela de PET (Polietileno Tereftalato) mediante el uso de un horno eléctrico y otro que usa microondas. Se presenta un trabajo práctico, útil para bachillerato y primer semestre de carreras de ingeniería química. Se tomaron los datos de experimentos realizados y corroborados en el laboratorio (Hernández, 2006), los cuales se realizaron con muestras de hojuela de PET obtenidas de botellas de bebidas carbonatadas, con las mismas propiedades fisicoquímicas. De los resultados observados se puede concluir que el uso de microondas en el secado de PET reduce el consumo de energía.

Palabras clave

Calor, microondas, ahorro de energía, secado, PET.

Abstract

This paper reviews the thermodynamic concepts of First Law of Thermodynamics and heat and how they are applied to calculate the energy required for drying. To this end, the energy required for PET (Polyethylene Terephthalate) flake drying using an electric oven and a microwave oven is compared. Practical, helpful work in high school and first chemical engineering courses is presented. The experimental data arose from tests conducted in the laboratory and corroborated elsewhere (Hernández, 2006). They were obtained for PET flakes from soft drink bottles; they had the same physicochemical properties. From the observed results, it can be concluded that the microwave treatment of PET reduces energy consumption compared to the electric oven.

Keywords

Heat, microwave, saving of energy, drying, PET.

¹ Instituto Politécnico Nacional, México.

² Instituto de Química, UNAM. México.

Introducción

Sabemos que la Termodinámica es una ciencia fundamental para la formación científica de nuestros estudiantes, especialmente de las carreras de ingeniería. Hadfield y Wieman investigaron las interpretaciones de estudiantes, que completaron un curso de Físicoquímica básica, sobre la ecuación de la Primera Ley de la Termodinámica por medio de encuestas de opción múltiple, encuestas de respuesta abierta y entrevistas. Las encuestas y entrevistas mostraron que la mayoría de los estudiantes fueron incapaces de distinguir los conceptos representados en la ecuación de la Primera Ley. De los 10 alumnos entrevistados, que identificaron correctamente la ecuación de la Primera Ley de la Termodinámica ($\Delta U = q + w$), 8 alumnos no fueron capaces de relacionar correctamente las ideas de conversión y conservación de energía con los símbolos en la ecuación; en la entrevista individual, se les preguntó ¿Cómo la ecuación de la Primera Ley representa la conservación y conversión de energía? Cuatro estudiantes justificaron su respuesta haciendo referencia al escenario en el cual $\Delta U = 0$ y que $q = -w$; dos escribieron $\Delta U = 0$ y $q = -w$ y los otros dos describieron este resultado en palabras. Respuesta 1: "...escribí que ΔU es igual a cero, $q = w$, y pienso que, quiere decir que no hay nada creado en el universo, por lo tanto, $q = \text{delta}$, o $q = -w$, y quiere decir que puede ser convertido de uno a otro; pero no creado. Entonces, delta U no está cambiando. Creo que el cambio total en el universo, $q + w$, $q = -w$; solo lo asocié con la Primera Ley, realmente no sé porque, tal vez porque la he visto escrita una y otra vez". Respuesta 2: "delta U igual a $q + w$, el cambio en la energía interna puede ser el resultado de cambios en calor y trabajo. Definitivamente sería porque U, la energía interna, o la energía del sistema no va a cambiar; pero, puede cambiar de calor a trabajo o de trabajo a calor". Los resultados sugieren que se debe poner mayor atención en ayudar a los estudiantes a comprender el significado físico de las ecuaciones en los cursos de Termodinámica (Hadfield and Wieman, 2010). La enseñanza de conceptos termodinámicos se basa en algoritmos, donde el entendimiento conceptual es una consecuencia de la realización de cálculos matemáticos; sin embargo, lo opuesto se encuentra frecuentemente en las investigaciones realizadas al respecto (Nilsson and Niedderer, 2014). Una de las dificultades en el aprendizaje de la Termodinámica es dominar la gran cantidad de conceptos abstractos (Hamilton, 2003). Los objetivos de la enseñanza de la ciencia en todos los niveles deben ser el entendimiento conceptual y la indagación científica. La ciencia se reduce a un nivel de repetición que llega a ser aburrido y el aprendizaje a tarea rutinaria; además, la parte experimental en las escuelas consiste frecuentemente en actividades de verificación que requieren poco análisis, su propósito es confirmar hechos y conceptos discutidos en el texto; sin embargo, no se aprende mucho acerca de cómo los científicos llevan a cabo la investigación de una hipótesis (Gabel, 2003). Una sugerencia común para lograr el entendimiento conceptual es la introducción de descripciones cualitativas antes de realizar cálculos; por lo tanto, nuestra aportación será muy útil, puesto que, desde una perspectiva pedagógica, el secado de plásticos presenta una excepcional oportunidad educativa por la variedad de tecnologías disponibles para efectuarlo. Nos ayuda a la identificación de conceptos clave que son importantes para introducir a los jóvenes a esta asignatura que es formativa, por su carácter globalizante y generalizador. En los planes de estudio de nivel medio superior y superior, la termodinámica se ocupa de la formación del estudiante en el aprendizaje de los principios básicos relacionados con el análisis de sistemas energéticos, lo cual constituye la

base para la comprensión del funcionamiento y manejo de distintos dispositivos y equipos utilizados en la industria; con esto se busca anclar sólidos conocimientos sobre la aplicación de la primera y segunda ley de la termodinámica y el uso racional de la energía requerida, manteniendo el equilibrio entre los recursos utilizados, las necesidades presentes y futuras de la sociedad y los beneficios económicos obtenidos (Galicia et al., 2005).

De acuerdo con lo anterior, nuestra preocupación por mejorar el aprendizaje de algunos conceptos básicos de la Termodinámica, al nivel de bachillerato y para los primeros semestres de las carreras de química y las ingenierías, nos condujo a escribir este trabajo práctico en el que se pueden identificar para su discusión algunos conceptos básicos como: temperatura, la energía y su transformación, calor, calor sensible, calor latente, calor específico; así como, su aplicación a la operación de secado, que es muy común en la industria, específicamente en los procesos de reciclado de materiales plásticos.

La energía es importante en la mayoría de los aspectos cotidianos; por ejemplo, la operación de secado se utiliza para separar el líquido, generalmente agua, de un sólido, aplicando un aumento de temperatura para que el agua se evapore completamente (Treybal, 2003). La cantidad de agua evaporada depende de la cantidad de agua presente. Algunos ejemplos del fenómeno son el secar la ropa al sol, el secado de quitaesmaltes, la evaporación del sudor, el secado de agua en las calles, la extracción de sal. De ahí que sea importante tener una buena comprensión de las fuentes energéticas, la conversión de la energía de una forma a otra y las ramificaciones de estas conversiones. Existen varios tipos de energía: térmica, lumínica, química, atómica, mecánica, eléctrica, cinética, potencial y, electromagnética; y entre ellas, se pueden transformar. En el análisis termodinámico, con frecuencia es útil considerar dos grupos para las diversas formas de energía que conforman la energía total de un sistema: macroscópicas (energías cinética y potencial) y submicroscópicas (energía interna y entalpía). La energía interna se define como la suma de las energías cinética y potencial de las moléculas del sistema. La entalpía se puede definir como la suma de la energía interna más el producto de la presión por el volumen.

La Primera Ley de la Termodinámica, conocida también como el principio de la conservación de la energía, brinda una base para estudiar las relaciones entre las diversas formas de interacción de energía. La energía se puede transferir hacia o desde un sistema en tres formas: calor, trabajo y flujo másico. Las interacciones de energía se reconocen en las fronteras del sistema cuando lo cruzan, y representan la energía que gana o pierde un sistema durante un proceso. En un sistema cerrado (aquel en el que sólo transfiere energía; pero no materia) las formas de interacción son la transferencia de energía en forma de calor y de trabajo. Estas formas de interacción provocan en el sistema sufra un cambio de temperatura, que, de acuerdo con la Ley Cero de la Termodinámica, la Temperatura es una propiedad que es posible medir.

La transferencia de energía en forma de calor hacia un sistema (ganancia de energía interna del sistema); la transferencia de energía en forma de calor desde un sistema (pérdida de energía interna del sistema). Se recomienda que si $Q > 0$, esto indica un incremento de energía en el sistema; si $Q < 0$ indica una reducción de energía en el sistema bajo discusión (IUPAC, 1969). En este caso Q designa el calor.

La transferencia de energía en forma de trabajo a un sistema (es decir, el trabajo realizado sobre el sistema, incrementa la energía del sistema); la transferencia de energía en forma de trabajo desde un sistema (es decir, el trabajo realizado por el sistema, reduce la energía interna del sistema) (Cengel y Boles, 2009).

Considerando lo anterior, el balance de energía para un sistema que experimenta cualquier clase de proceso, de manera compactada:

$$[Energía\ entrada] + [Energía\ salida] = \Delta Energía\ del\ sistema$$

Para un ciclo se expresa en términos de interacciones de calor y trabajo como:

$$Q + W = \Delta U$$

Se sabe que se requieren distintas cantidades de energía para elevar en un grado la temperatura de masas idénticas pertenecientes a sustancias diferentes. Por lo tanto, la propiedad que permite comparar la capacidad de intercambio de energía de varias sustancias es el calor específico. En termodinámica, el interés se centra en dos clases de calores específicos: calor específico a volumen constante (C_v) y calor específico a presión constante (C_p). En otras palabras, C_v es una medida de la variación de energía interna de una sustancia con la temperatura, a volumen constante y C_p es una medida de la variación de entalpía de una sustancia con la temperatura, a presión constante (Cengel y Boles, 2009).

La energía transferida en forma de calor puede provocar un cambio de temperatura en un sistema, a este calor se le conoce como calor sensible; por otro lado, si provoca un cambio de estado de agregación se conoce como calor latente (λ).

La transferencia de energía de un sistema hasta otro sistema se puede calcular sobre la base que considera que, la energía ganada por un sistema es igual a la energía perdida por el otro sistema, dado que suponemos que la energía se conserva, a este flujo de energía se le conoce normalmente como calor (Q).

$$Q_{\text{ganado}} = -Q_{\text{perdido}} \quad (1)$$

Para calcular la cantidad de energía en forma de calor que se transfiere desde o hacia un sistema en particular, cuando es calor sensible, se emplea la siguiente expresión:

$$Q = mC_p(T_f - T_i) \quad (2)$$

Donde:

Q Cantidad de calor involucrado [J]

m Masa del sistema [kg]

C_p Calor específico [J/kg °C]

T_f Temperatura final del sistema [°C]

T_i Temperatura inicial del sistema [°C]

Para sólidos y líquidos, donde los volúmenes específicos permanecen constantes durante un proceso, los calores específicos a volumen y presión constantes son idénticos (Cengel y Boles, 2009).

Para calcular la energía en forma de calor que se transfiere desde o hacia un sistema en particular, cuando es calor latente, se emplea la siguiente expresión:

$$Q = m\lambda \quad (3)$$

Donde:

Q Cantidad de calor involucrado [J]

m Masa del agua evaporada [kg]

λ Calor latente de vaporización [J/kg]

Los sólidos húmedos como el PET antes de ser extruidos deben secarse, para ser procesado el PET requiere una humedad menor de 0.005 % en base húmeda (Zamorano y Palacios, 2019); para ello debemos calentarlo, este calentamiento se realiza en dos etapas: primero, para alcanzar una temperatura de trabajo, llamado calor sensible; después, suministrar más energía en forma de calor para producir la evaporación del agua, calor latente, ecuación (4):

$$Q = [m_{PET} C_{p_{PET}} (T_f - T_i) + m_{agua} C_{p_{agua}} (T_f - T_i)] + [m_{agua} \lambda_{agua}] \quad (4)$$

Calor sensible Calor latente

Al utilizar un horno de microondas, sólo consume la energía que calentará la masa de agua, sin que se utilice energía para calentar el PET, el aire dentro del horno ni el recipiente que contiene al sólido, porque estos materiales no absorben las microondas.

$$Q = [m_{agua} C_{p_{agua}} (T_f - T_i) + [m_{agua} \lambda_{agua}]] \quad (5)$$

Calor sensible Calor latente

Las microondas poseen tres características fundamentales, similares a las de la luz visible: se reflejan, se transmiten y son absorbidas (Metaxas and Meredith, 1988). Por su comportamiento frente a las microondas, los materiales se clasifican en tres grupos: los transparentes que conducen; pero no absorben las microondas; los que reflejan las microondas, y los que absorben a las microondas, como el agua.

La transformación de energía electromagnética, en los materiales que absorben las microondas (para nuestro caso el agua contenida en el PET), el calentamiento se lleva a cabo de acuerdo con la siguiente ecuación (6), considerando que es mínima la conducción de calor en el material y la pérdida de calor al medio que lo rodea, la energía absorbida por un material absorbente de microondas colocado en un campo eléctrico uniforme es:

$$P_a = 55.6 \times 10^{-8} f E^2 \epsilon'' \quad (6)$$

Donde (P_a) es la potencia absorbida por el material absorbente en W/m^3 , (f) es la frecuencia en Hz, (ϵ'') el factor de pérdida y (E) es la intensidad del campo eléctrico en V/m.

En nuestro caso el PET, y el aire dentro del horno son materiales transparentes que no absorben las microondas. Las microondas son absorbidas por las moléculas de agua presentes en el material húmedo, funcionando como imanes con un polo positivo y otro negativo, siguiendo la dirección del campo magnético que se invierte 2500 millones de veces por segundo; así que cuando se alinean con una onda deben volver a rotar para alinearse con la siguiente, este procedimiento realizado simultáneamente por millones de moléculas genera calor.

El trabajo práctico que presentamos es sencillo en su implementación, porque a partir de instrumentos y materiales que existen en los Laboratorios de Bachillerato y Licenciatura en la UNAM y también en casa como: un horno de microondas, envases de bebidas carbonatadas fabricadas con PET, termómetro para usarse en la preparación de alimentos en el horno de microondas; es posible hacer experimentos en un tiempo razonable, estudiando la operación de secado de materiales poliméricos sintéticos; también

se pueden discutir algunos principios básicos como La Primera Ley de la Termodinámica, partiendo de la activación de conocimientos previos, como calor sensible y calor latente, y promover la organización de la información a aprender, y para potenciar la conexión entre los conocimientos previos y la nueva información. En la práctica que presentamos se puede observar la transformación de la energía eléctrica en microondas y después en calor, que es empleado para eliminar el agua contenida en los materiales poliméricos en estudio.

Materiales y métodos

Los resultados experimentales fueron obtenidos en el Laboratorio de Físicoquímica Macromolecular de la Facultad de Química de la UNAM, México. Las pruebas se realizaron con muestras de hojuela de PET obtenidas de botellas de una bebida carbonatada (Figura 1), de 100 g cada una, con las mismas propiedades fisicoquímicas, tales como: cristalinidad 30%, humedad (6.1 % base húmeda), número promedio de hojuelas por gramo y viscosidad. (Hernández, 2006).



FIGURA 1. Ejemplos de botellas para bebidas carbonatadas ([Gastronomía y Cía-Republica.com](http://Gastronomía.y.Cía-Republica.com)).

Los equipos utilizados fueron: a) Horno eléctrico con intervalo de trabajo de 30 a 450 °C con un termómetro de mercurio para el control de temperatura y potencia de 1200 W, el fabricante manifiesta que el horno está recubierto con múltiples capas de asbesto que impide que la energía en forma de calor llegue al exterior del equipo b) Horno de microondas a 2.45 GHz, modelo DMR-141 con plato giratorio, control de temperatura, termómetro de alcohol para horno de microondas y un termómetro infrarrojo. La potencia generada por el magnetrón puede ser ajustada entre 78 a 700 W y c) analizador de humedad. Datos tomados de (Hernández, 2006) corroborados en el laboratorio. Con el propósito de hacer una comparación eficaz, entre la energía necesaria para disminuir la humedad de hojuela PET mediante el uso de un horno eléctrico y otro que usa microondas, se llevaron a cabo experimentos con las variables de control de tiempo, temperatura y tipo de horno.

El procedimiento general para cada experimento fue: a) medir la humedad inicial del PET con el analizador de humedad; b) pesar 100 gramos de PET húmedo en la báscula dentro del porta hojuelas; c) introducir porta hojuelas al horno; d) ajustar la potencia deseada; e) fijar el tiempo de cada experimento; f) inicio del secado; g) al concluir el tiempo de secado, retirar la muestra del horno y medir la humedad final con el analizador de humedad. Cada prueba se realizó por triplicado y los resultados de cada una se promediaron, encontrando un error experimental de +/- 3.0 %

En este trabajo no se consideró el efecto de las condiciones ambientales en la determinación del contenido de humedad de la muestra seca, lo que sin duda provoca un incremento de humedad en las muestras durante el traslado desde el horno al analizador de humedad; y es importante mencionar que nuestros resultados son comparativos siguiendo las dos formas de secado.

Una vez tabulados los resultados de los experimentos, se procede a calcular la energía consumida durante el secado de PET para realizar la comparación entre los experimentos.

Cálculos para su discusión

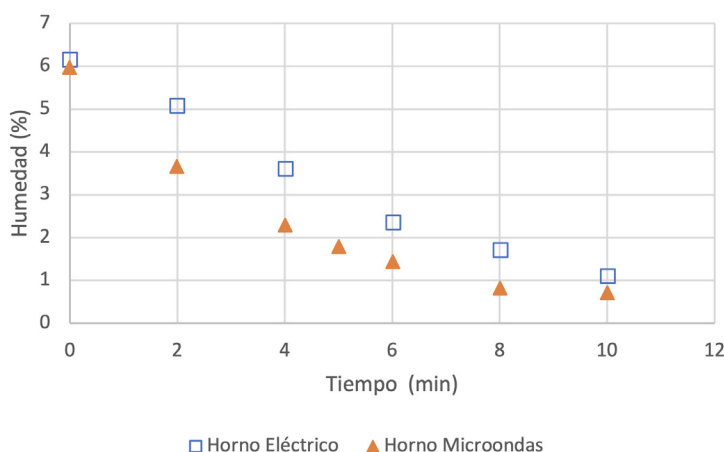
En este apartado presentamos el comportamiento del secado del PET cuando se calienta usando un horno eléctrico y un horno de microondas, manteniendo fija la temperatura a 70 °C y 50 °C, a diferentes tiempos de calentamiento. Se estudió el consumo energía para cada una de las temperaturas y después realizar la comparación entre el consumo de energía para el secado de PET de horno eléctrico y un horno de microondas.

En la Tabla 1 se muestran los contenidos de humedad final, que se obtuvieron después de calentar la muestra de 100 g del PET, para distintos tiempos de exposición a una potencia de 700 W; para el calentamiento con microondas y con un horno eléctrico, manteniendo constante la temperatura del sistema a 70 °C y 50 °C.

TABLA 1. Efecto del tiempo de secado sobre el porcentaje de humedad, usando un horno de microondas a una potencia de 700 W y horno eléctrico, manteniendo la temperatura constante a 70 °C y 50 °C. (Son parte de los datos de Hernández, O. (2006), *Proceso de secado del PET, microondas vs calentamiento conductivo*. México D.F., México: UNAM).

Tiempo (min)	50 °C		70 °C	
	Horno Eléctrico (% humedad)	Horno Microondas (% humedad)	Horno Eléctrico (% humedad)	Horno Microondas (% humedad)
0	6.19	6.06	6.16	5.97
2	5.43	4.9	5.08	3.65
4	4.48	3.43	3.62	2.29
6	3.85	2.5	s/dato	1.79
8	3.35	1.8	2.37	1.43
10	2.65	1.36	1.72	0.82
12	1.98	1.1		
14	1.79	0.75		
16	1.19	0.53		

En la Figura 2, se presenta de manera grafica el comparativo entre el de secado de PET hecho con horno de microondas y en horno eléctrico. En la gráfica se observa qué al usar un horno de microondas, el secado es más rápido que al usar un horno eléctrico; se puede observar qué a los 2 minutos, existe una diferencia grande entre los dos procesos, y los puntos que representan el uso de horno de microondas está por debajo de los puntos del proceso con horno eléctrico. En el horno de microondas a este tiempo se tiene un contenido de humedad de 3.65 %, mientras que en el horno eléctrico se tiene un contenido de humedad del 5.08 %.



Después de 8 minutos, la diferencia es pequeña; pero, el horno de microondas sigue estando por debajo de los puntos que representan el proceso con horno eléctrico.

En la Figura 3, se presenta de manera gráfica el comparativo entre el de secado de PET hecho con horno de microondas y en horno eléctrico a 50 °C. En la gráfica se observa que, al usar un

FIGURA 2. Humedad vs tiempo de secado de hojuela de PET a 70 °C, usando dos tipos de horno: eléctrico y de microondas.

horno de microondas, el secado es más rápido que al usar un horno eléctrico; se puede observar que, a los 8 minutos, existe una diferencia grande entre los dos procesos. En el horno de microondas a este tiempo se tiene un contenido de humedad de 1.8 %, mientras que en el horno eléctrico se tiene un contenido de humedad del 3.35 %. Los valores del horno de microondas se mantienen debajo de la línea que representa al horno eléctrico hasta los 16 minutos que se tienen graficados.

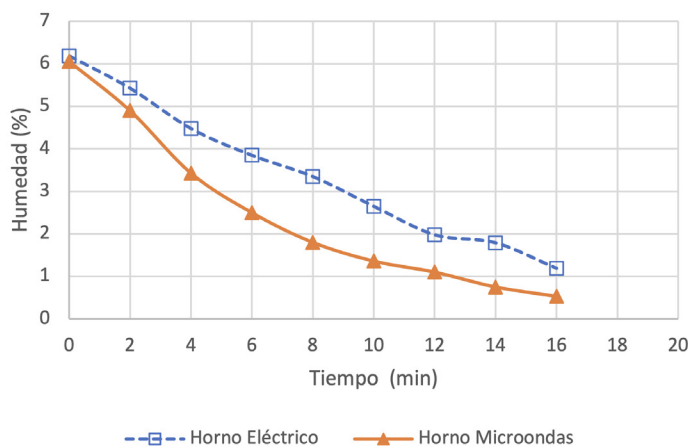


FIGURA 3. Humedad vs tiempo de secado de hojuela de PET a 50 °C, usando dos tipos de horno: eléctrico y de microondas.

Balace de energía

A continuación, se desarrolla la relación de la Primera Ley de la Termodinámica para el secado de PET húmedo en el que hay transferencia de energía en forma de calor; pero, no transferencia de energía en forma de trabajo. El principio de la conservación de la energía se expresa: como el cambio neto (incremento o disminución) en

la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale del sistema.

$$(Energía\ total\ que\ entra) + (Energía\ total\ que\ sale) = (Cambio\ de\ energía\ total)$$

o

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema} \quad (7)$$

a) En el horno eléctrico:

Se considera el material húmedo, PET y su humedad, como el sistema. Para el calentamiento del material húmedo, el horno se precalienta a 70 °C y después se introduce el material a calentar. En nuestro caso la energía total que entra se considera a partir de introducir el material al horno, y considerando que la electricidad se puede convertir en una cantidad igual de energía en forma de calor (Cengel y Boles, 2009), el horno convierte la energía eléctrica que recibe a razón de 1200 J/s. El intercambio de energía será del aire caliente hacia el sistema. La energía en forma de calor incrementa la energía cinética del sistema, dando como resultado un incremento en la temperatura del PET y del agua; que provoca la evaporación de una parte del agua contenida en el PET.

Al aplicar el balance de energía, ecuación (7), para el calentamiento de una muestra húmeda de PET a una temperatura de 70 °C, el cambio de la energía del sistema se determina a partir de la ecuación (4)

$$E_{entrada} - E_{salida} = [m_{PET} Cp_{PET} (T_f - T_i) + m_{agua} Cp_{agua} (T_f - T_i)] + [m_{agua} \lambda_{agua}] \quad (8)$$

Calor sensible Calor latente

Como la velocidad de calentamiento es diferente en ambos hornos, se toma como base el tiempo de exposición donde el valor de la humedad es prácticamente el mismo: 1.72 % para el horno eléctrico y 1.79 % para el horno de microondas (Tabla 1).

Tomando en cuenta una temperatura inicial de 25 °C, alcanzando una cantidad de agua al final del secado de 1.72 g. Para obtener la cantidad de agua que se evaporó, se resta este valor a la cantidad de agua inicial, 6.16 g – 1.72 g = 4.44 g de agua que fueron evaporados en 8 minutos (480 s):

Los términos de entrada y cambio en la energía del sistema en la ecuación (8) se determinan como:

$$E_{\text{entrada}} = (1.2 \text{ kJ/s})(480 \text{ s}) = 576 \text{ kJ}$$

$$m_{\text{PET}} C_{p_{\text{PET}}}(T_f - T_i) = (0.09384 \text{ kg})(0.4393 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C})(70 - 25)^\circ\text{C} = 1.85 \text{ kJ}$$

$$m_{\text{agua}} C_{p_{\text{agua}}}(T_f - T_i) = (0.00616 \text{ kg})(4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C})(70 - 25)^\circ\text{C} = 1.16 \text{ kJ}$$

$$m_{\text{agua}} \lambda_{\text{agua}} = (0.00444 \text{ kg})(2333.0 \text{ kJ/kg}) = 10.36 \text{ kJ}$$

$$\Delta E_{\text{sistema}} = 1.85 \text{ kJ} + 1.6 \text{ kJ} + 10.36 \text{ kJ}$$

$$\Delta E_{\text{sistema}} = 13.37 \text{ kJ}$$

Al sustituir en la ecuación de balance de energía, se obtiene

$$576 \text{ kJ} - E_{\text{salida}} = 13.37 \text{ kJ}$$

Si se transfieren 576 kJ de calor al sistema desde el aire caliente a 70 °C y el incremento de energía del PET y el agua es igual a 13.41 kJ; se pierden 562.63 kJ del aire caliente al medio ambiente.

Al aplicar el balance de energía, ecuación (8), para el calentamiento de una muestra húmeda de PET a una temperatura de 50 °C. Se siguió el mismo procedimiento que para la temperatura de 70 °C.

Los términos de entrada y cambio en la energía del sistema en la ecuación (8):

$$E_{\text{entrada}} = 1008 \text{ kJ}$$

$$\Delta E_{\text{sistema}} = 11.95 \text{ kJ}$$

Al sustituir en la ecuación de balance de energía, se obtiene

$$1008 \text{ kJ} - E_{\text{salida}} = 11.95 \text{ kJ}$$

Si se transfieren 1008 kJ de calor al sistema desde el aire caliente a 70 °C y el incremento de energía del PET y el agua es igual a 11.95 kJ; se pierden 996.05 kJ del aire caliente al medio ambiente.

b) En el horno de microondas:

El horno de microondas no requiere precalentamiento; en este caso la energía total que entra se considera a partir del encendido del horno. El magnetrón convierte la energía eléctrica que recibe, en energía electromagnética (microondas) a razón de 700 J/s. La conservación de la energía requiere que la energía del sistema más la energía dentro del horno, aumenten en la misma cantidad a la de la energía electromagnética que entra al horno.

Al aplicar el balance de energía, ecuación (7), para el calentamiento de una muestra húmeda de PET a una temperatura de 70 °C, donde el cambio de la energía del sistema se determina a partir de la ecuación (5)

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = [m_{\text{agua}} \lambda_{\text{agua}} (T_f - T_i)] + [m_{\text{agua}} \lambda_{\text{agua}}] \quad (9)$$

Calor sensible Calor latente

Tomando en cuenta una temperatura inicial de 25 °C, alcanzando una cantidad de agua al final del secado de 1.79 g. Para obtener la cantidad de agua que se evaporó, se resta este valor a la cantidad inicial de agua, 5.97 g – 1.79 g = 4.18 g de agua que fueron evaporados en 5 minutos (300 s):

Siguiendo el procedimiento para el cálculo de la energía de entrada y cambio en la energía del sistema en la ecuación (9) tenemos:

$$E_{\text{entrada}} = 210 \text{ kJ}$$

$$\Delta E_{\text{sistema}} = 10.87 \text{ kJ}$$

Al sustituir en la ecuación de balance de energía, se obtiene

$$210 \text{ kJ} - E_{\text{salida}} = 10.87 \text{ kJ}$$

Si se transfieren 210 kJ de energía de microondas al sistema desde el magnetrón y el incremento de energía del agua es igual a 10.87 kJ; se pierden 199.13 kJ de la energía de microondas disponible al interior del horno.

Al aplicar el balance de energía, ecuación (9), para el calentamiento de una muestra húmeda de PET a una temperatura de 50 °C.

Tomando en cuenta una temperatura inicial de 25 °C, alcanzando una cantidad de agua al final del secado de 1.8 g. Para obtener la cantidad de agua que se evaporó, se resta este valor a la cantidad inicial de agua, 6.06 g – 1.8 g = 4.26 g de agua que fueron evaporados en 8 minutos (480 s):

Los términos de entrada y cambio en la energía del sistema en la ecuación (9) se calculan de la misma forma que a 70 °C:

$$E_{\text{entrada}} = 336 \text{ kJ}$$

$$\Delta E_{\text{sistema}} = 10.57 \text{ kJ}$$

Al sustituir en la ecuación (7) de balance de energía, se obtiene

$$336 \text{ kJ} - E_{\text{salida}} = 10.57 \text{ kJ}$$

Si se transfieren 336 kJ de energía de microondas al sistema desde el magnetrón en 8 minutos y el incremento de energía del agua es igual a 10.57 kJ; se pierden 325.43 kJ de la energía de microondas disponible al interior del horno.

Como podemos observar a la temperatura de 50 °C y 70 °C, la energía eléctrica suministrada al sistema es mayor que la energía necesaria para la evaporación del agua; al final la diferencia de energía electromagnética se disipa dentro del horno.

Si comparamos la energía que se requiere para evaporar la humedad a una temperatura de 70 °C, en la Tabla 3 se muestran los valores obtenidos para el consumo de energía, para llegar a un contenido de humedad del 1.72 %, en el secado con horno eléctrico y de 1.79 % de humedad con horno de microondas, a una potencia de 700 W manteniendo una

temperatura de 70 °C. Se observa una diferencia en el consumo de energía, que representa un 26.69 % menos energía utilizando el horno de microondas.

TABLA 3. Comparativo entre la energía requerida para el calentamiento con Horno Eléctrico vs Microondas (700 W) a una temperatura controlada de 50 °C y 70 °C.

Tipo de calentamiento	Unidades	Valor a 50 °C	Valor a 70 °C
Horno eléctrico	kJ	11.95	13.37
Horno de microondas	kJ	10.57	10.87
Diferencia en consumo %		11.55	18.70

Podemos comparar la energía que se requiere para evaporar a una temperatura de 50 °C, en la Tabla 3. Desde el punto de vista termodinámico, la energía, que entra al sistema, es energía eléctrica que proviene de una serie de transformaciones; estas transformaciones dependen del proceso utilizado para su generación. Esta es una gran oportunidad para identificar los conocimientos previos de los estudiantes, que puede ayudarnos a relacionar y distinguir tipos y transformaciones de la energía; siguiendo la Primera Ley de la Termodinámica que dice “la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma de un tipo a otro”.

El experimento realizado con el horno de microondas se puede definir de forma general como un sistema que, por medio de una entrada de energía, genera calor. el procedimiento comienza al momento de suministrar un tipo de energía (eléctrica) y al momento de accionar el horno, se produce la generación de energía electromagnética en forma de microondas que son emitidas por el magnetrón. Esta energía de microondas es responsable de incrementar la energía cinética de las moléculas de agua contenidas en el PET, la cual se encarga de generar calor por la fricción entre las moléculas. Durante el calentamiento del sistema, podemos identificar dos tipos de calor: el calor sensible y el calor latente.

Para el horno eléctrico, podemos decir que este procedimiento comienza al momento de suministrar un tipo de energía (eléctrica) y al momento de accionar el horno, se puede apreciar la transformación en energía calorífica, que es emitida por las resistencias del horno; esta energía se transmite hacia el aire dentro del horno para mantenerlo a una temperatura de 70 °C. Después la energía del aire se transfiere al PET húmedo en forma de calor. Durante el calentamiento del sistema, podemos identificar dos tipos de calor: el calor sensible y el calor latente.

Conclusiones

Con base en los resultados experimentales obtenidos para horno eléctrico y de microondas, como se puede observar en la Tabla 1, estos resultados muestran un tiempo de secado menor con horno de microondas, con una potencia de 700 W a 70 °C, pues para obtener un porcentaje de humedad de 1.79 %, se obtiene al calentar durante 5 minutos; mientras que para el calentamiento hecho con horno eléctrico, a 70 °C, se requieren 8 minutos para alcanzar un porcentaje de humedad de 1.72 %.

Como se puede observar en la Tabla 2, estos resultados muestran un tiempo de secado menor con horno de microondas, con una potencia de 700 W a 50 °C, pues para obtener un porcentaje de humedad de 1.8 %, es necesario calentar durante 8 minutos; mientras que para el calentamiento con horno eléctrico, a 50 °C, se requieren 14 minutos para alcanzar un porcentaje de humedad de 1.79 %.

Se puede observar que al usar energía de microondas la humedad del PET disminuye de un 6 % hasta 1.79 % al calentar durante 8 minutos manteniendo constante la temperatura de 70 °C; pero, después de los 8 minutos y debido a que la humedad es baja, la rapidez en la reducción de la humedad disminuye considerablemente (Nakagomi, 1991).

Este trabajo da la oportunidad educativa para que los estudiantes se familiaricen con: términos termodinámicos como la temperatura y el calor; además de, la Primera Ley de la Termodinámica fuera del salón de clases, en casa o en otros cursos académicos usando un ejemplo (secado) del mundo real. Puede servir como una estrategia para la apreciación de la naturaleza interactiva de la ciencia, la tecnología y sociedad, al mostrar el interés hacia los esfuerzos en el desarrollo de métodos de secado más efectivos ambientalmente y de bajo costo.

La energía de las microondas puede mejorar el proceso de secado de PET reduciendo el tiempo de secado y el consumo de energía hasta en un 18 %, en comparación con el sistema usando horno eléctrico.

Referencias

- Cengel, Y. y Boles, M. (2009): *Termodinámica*. 6a. Edición, México D.F., México: Mc Graw Hill.
- Hernández, O. (2006), *Proceso de secado del PET, microondas vs calentamiento conductivo*. México D.F., México: UNAM.
- Gabel, D. (2003), *Enhancing the conceptual understanding of science*. Educ. Horiz., 81, 70-76.
- Hadfield, L. and Wieman, C. (2010), *Student interpretations of equations related to the first law of Thermodynamics*. J. Chem. Educ., 87,7, 750-755. <https://doi.org/10.1021/ed1001625>
- Hamilton, T. (2003), *Thermodynamics for visual learners*. J. Chem. Educ., 80, 12, 1245. <https://doi.org/10.1021/ed080p1425>
- Galicia, M. Martínez, D. Mendoza, A. Ramírez, R. y Romero, M. (2005): *Evaluación y selección del Proceso de reciclado de PET, mediante herramientas de planeación de Proyectos*. México D.F., México: IPN.
- Metaxas, A. and Meredith, R. (1988): *Industrial Microwave Heating*. London, England: Institution of Engineering and Technology.
- Nakagomi, S., *Plastic material dryer*. US Patent 4996779, 1991.
- Nilsson, T. and Niedderer, H. (2014), *Undergraduate student's conceptions of enthalpy, enthalpy change and related concepts*. Chem. Educ. Res. Pract. 2014, 15, 336-353.
- IUPAC (1969), *Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units*. Adopted by the IUPAC. <http://media.iupac.org/publications/pac/1970/pdf/2101x0001.pdf>
- Treybal, R. (2003): *Operaciones de transferencia de masa*. México D.F., México: Mc Graw Hill.
- Zamorano, C. y Palacios, J. (2019): «Estado del arte en la aplicación de la energía de microondas para el secado de polyester grado botella (PET)». *Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería*, núm. 111, pp. 38-52.