

CALOR DE COMBUSTIÓN

Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica

Resumen

En esta práctica se pretende determinar el calor de combustión, por medio de una bomba calorimétrica, para varias muestras de residuos de la broza del café (muestra B111003). La calibración del calorímetro se logra determinando el calor de combustión de una sustancia de referencia, en este caso el ácido benzoico.

Se obtuvo un valor para la capacidad calorífica del calorímetro de $9135.7 \text{ J/}^\circ\text{C}$ y un valor promedio para el calor de combustión de broza de café, con un porcentaje de humedad del 25%, de 11874.6 J . El análisis estadístico mostró que no hay diferencia significativa entre los valores obtenidos y su promedio.

Se recomienda tomar mayor cantidad de mediciones antes de la ignición, con el fin de facilitar los cálculos y usar suficiente cantidad de agua en el calorímetro para facilitar el intercambio calórico.

Keywords

Calor, combustión

Marco Teórico

Durante los años 1840 a 1878, J.P. Joule llevó a cabo una serie de experimentos cuidadosos sobre la naturaleza del trabajo y el calor. Estos experimentos son fundamentales para comprender la primera ley de la termodinámica y el concepto moderno de energía.

Los experimentos de Joule eran bastantes sencillos, pero él tomó muchas precauciones para asegurar la exactitud. En su famosa serie de mediciones, Joule colocó cantidades conocidas de agua en un contenedor aislado y agitó el agua con un agitador giratorio. La cantidad de trabajo hecha sobre el agua por el agitador fue medida con exactitud, anotándose los cambios de temperatura del agua. Joule encontró que se necesitaba una cantidad fija de trabajo por unidad de masa por cada grado de aumento en la temperatura provocado por el agitador, y que la temperatura original del agua podía restablecerse por la transferencia de calor a través del simple contacto con un objeto más frío. Así fue como Joule mostró de manera concluyente la existencia de una relación cuantitativa entre el trabajo y calor y que, en consecuencia, el calor es una forma de energía. En este tipo de pruebas se añade energía al agua como trabajo, pero se extrae de ésta como calor. Con esto cabe la pregunta de qué es lo que sucede a la energía entre el momento en que se añade al agua como trabajo y el momento en que se extrae como calor. La lógica sugiere que esta energía se encuentra contenida en el agua, en otra forma, la cual se define como *energía interna*.

La energía interna se refiere a la energía de las moléculas que forman la sustancia, las cuales se encuentran en un movimiento continuo y tienen energía cinética de traslación, con excepción de las moléculas monoatómicas que también poseen energía de rotación y de vibración interna. La adición de calor a la sustancia aumenta esta actividad molecular, provocando un aumento en la energía interna. El trabajo hecho sobre la sustancia puede tener el mismo efecto, tal como lo demostró Joule.

La energía interna de una sustancia también incluye la energía potencial resultante de las fuerzas intermoleculares. A esta escala submolecular, existe una energía asociada con los electrones y los núcleos de

los átomos, así como una energía de enlace resultante de las fuerzas que mantienen unidos los átomos como moléculas. Aunque se desconocen los valores absolutos de la energía interna, este hecho no representa ninguna desventaja en el análisis termodinámico, ya que sólo se necesitan los *cambios* de energía interna.

La designación de esta forma de energía como interna la distingue de la energía cinética y potencial que pueda tener una sustancia como resultado de su posición o movimiento macroscópicos, y que pueden considerarse como formas *externas* de energía.

El reconocimiento del calor la energía interna como formas de energía sugiere una generalización de la ley de la conservación de la energía mecánica para aplicarla al calor y al energía interna, así como al trabajo y a la energía cinética y potencial externas. Al principio esta generalización no fue más que un postulado, pero sin excepción alguna todas las observaciones hechas en procesos ordinarios la apoyan. De aquí que el postulado haya alcanzado el estado de ley de la naturaleza y se conozca como primera ley de la termodinámica. Un planteamiento formal de ésta es:

Aunque la energía tome muchas formas, la cantidad total de energía es constante, y cuando la energía desaparece en una forma, aparece simultáneamente en otras formas.

Al aplicar la primera ley a un proceso dado, la esfera de influencia del proceso se divide en dos partes, el *sistema* y sus *alrededores*. La parte donde se lleva a cabo el proceso es la que se toma como sistema, mientras que todo aquello con lo que el sistema interactúe se considera como alrededores. El sistema puede tener cualquier tamaño dependiendo de las condiciones particulares, y sus fronteras pueden ser reales o imaginarias, rígidas o flexibles. En su forma más básica, la primera ley puede escribirse como:

$$\Delta(E_{\text{sistema}}) + \Delta(E_{\text{Alrededores}}) = 0$$

(1)

Los cambios en el sistema pueden darse en su energía interna, en su energía potencial o cinética o en la energía potencial o cinética de sus partes finitas. Puesto que la atención se dirige sobre el sistema, la naturaleza de los cambios de energía en los alrededores no es de interés.

En su sentido termodinámico, el calor y el trabajo se refieren a *energía en tránsito a través de la frontera* que divide al sistema de sus alrededores. Estas formas de energía no se almacenan y nunca están contenidas en el cuerpo o sistema.

Si la frontera de un sistema no permite el transporte de materia entre el sistema y el medio, entonces se dice que el sistema es *cerrado*, y su masa necesariamente constante.

Todo el intercambio entre un sistema cerrado y sus alrededores se hace como calor y trabajo. Por lo tanto el primer término de la ecuación 1 se puede remplazar por:

(2)

La selección de los signos utilizados para Q y W depende de la dirección del transporte considerada como positiva. El primer término de la ecuación 1 puede desarrollarse para mostrar cambios de energía en distintas formas. Si la masa es constante y sólo participan cambios en las energías interna, cinética y potencial,

(3)

donde es la energía total del sistema. Con esto la ecuación 1 puede escribirse como:

(4)

La convención de moderna del signo, tanto para el calor Q como para el trabajo W , hace que los valores numéricos de ambas cantidades sean positivos para el transporte, de los alrededores hacia el sistema, a través de la frontera. Con esto en mente, puede escribirse

(5)

La ecuación 2 indica que el cambio total de energía de un sistema de masa constante es igual a la energía neta transportada hacia él como calor y trabajo. Los sistemas cerrados a menudo experimentan procesos que no causan ningún cambio en su energía potencial o cinética, sino solamente en su energía interna. Para tales procesos la ecuación 2 se reduce a:

(6)

La ecuación 3 se aplica a procesos donde participan cambios *finitos* en la energía interna del sistema. Para cambios *diferenciales*, la ecuación 3 se escribe como:

(7)

Esta ecuación, al igual que la 3 se aplica a sistemas cerrados que experimentan únicamente cambios en su energía interna. El calor es visto a menudo, como se demostró anteriormente, en relación con el efecto que tiene sobre el objeto hacia o desde el cual se transfiere. Así se define una variable llamada capacidad calorífica como la cantidad de calor necesaria que se requiere por unidad de masa para elevar la temperatura en un grado. Entre mas pequeño sea el cambio de temperatura en un cuerpo provocado por la transferencia de una cantidad de calor dada, mayor es su capacidad. Entonces la capacidad calorífica se puede escribir como .

Existen dos capacidades caloríficas de uso muy común para fluidos homogéneos. Capacidad calorífica a volumen constante:

(8)

Capacidad calorífica a presión constante:

(9)

Ambas expresiones dan una relación entre un conjunto de propiedades termodinámicas y, por lo tanto, constituyen definiciones que son independientes del proceso particular que se lleve a cabo. Estas expresiones acomodan tanto capacidades caloríficas molares como específicas (las que usualmente se conocen como calores específicos), lo que depende del hecho de que U y H sean propiedades molares o específicas.

Un proceso donde se pone en práctica lo anterior es el de la combustión el cual consiste en la oxidación de los constituyentes del combustible, mediante una reacción química. La reacción de combustión se define como aquella entre un elemento o compuesto y el oxígeno, para formar ciertos productos de combustión. Para compuestos orgánicos formados sólo por carbono, hidrógeno y oxígeno, los productos son dióxido de carbono y agua; ésta última puede ser vapor o líquido. Entonces, la cantidad de energía que se libera por mol de hidrocarburo que se quema se conoce como *calor de combustión*.

Cuando una sustancia pura en estado sólido se licua o se vaporiza a partir de un estado líquido, a presión constante, no hay ningún cambio en la temperatura; sin embargo, el proceso requiere la transferencia de una cantidad finita de calor al sustancia. Estos efectos calóricos se conocen como *calor latente* de fusión y de vaporización respectivamente. La característica principal de todos estos procesos es la coexistencia de dos fases. De acuerdo con la regla de fases, un sistema de dos fases formado por una sola especie es univariante y su estado intensivo está determinado por la especificación de una sola propiedad intensiva. Por tanto, el calor

latente que acompaña a un cambio de fase es una función exclusiva de la temperatura, y está relacionado con las demás propiedades del sistema por una ecuación termodinámica exacta:

(10)

donde es el calor latente y es el cambio de volumen que acompañan al cambio de fases. Esta relación es conocida como la ecuación de Clapeyron.

Hay tres formas de transferencia de energía: conducción, convección y radiación. La transferencia de energía por conducción se realiza de dos maneras. El primer mecanismo es el de la interacción molecular, en el cual el aumento del movimiento de una partícula a un nivel de energía más alto, imparte energía a las moléculas adyacentes que se encuentran en niveles más bajos. Está presente, en cierto grado, en todos los sistemas en los que existe un gradiente de temperatura. Además deben encontrarse moléculas de sólido, líquido o gas. El segundo mecanismo es el de transferencia de calor por medio de electrones " libres ". Este tipo es importante, principalmente en los sólidos puramente metálicos. La ecuación básica que sirve para describir el proceso de conducción es:

$$\frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx}$$

(11)

Donde q_x es la rapidez de transferencia de calor en la dirección de x ; A es el área normal a la dirección de flujo de calor; k es la conductividad térmica y dT/dx es el gradiente de temperatura en la dirección x . Esta ecuación es la ley de Fourier de conducción de calor.

La transferencia de calor debida a la convección se relaciona con el cambio de energía que ocurre entre una superficie y un fluido adyacente. Existen dos tipos: la convección forzada, en la cual se hace pasar un flujo por una superficie sólida usando un medio externo, tal como un ventilador o una bomba y la convección libre o natural, en la que un fluido más caliente (o más frío), que se encuentra próximo a la frontera sólida, ocasiona la circulación a causa de la diferencia de densidades que resulta de la variación de temperatura en una región del fluido.

A diferencia de la transferencia de calor por convección, en la radiación no se requiere que intervenga un espacio lleno de materia para que las superficies intercambien calor. Esto es así porque la radiación térmica es un tipo de radiación electromagnética que depende únicamente de la temperatura en la superficie.

Uno de los instrumentos que utilizan una transferencia de calor como principio de funcionamiento es la bomba calorimétrica, con la cual se puede determinar el calor de combustión de una sustancia. La bomba calorimétrica, como la mostrada en la figura 1, se compone de un vaso cilíndrico de unos 300 cm³ de capacidad provisto de una tapa atornillada,. En la tapa se encuentran dos válvulas. Una de ellas se emplea para llenar la bomba con oxígeno, mientras que la otra se utiliza para dar salida a los gases de combustión después del ensayo. Para hacer hermética la junta , entre la tapa y el vaso se intercala un anillo de plomo, que encaja en una entalladura de la tapa y puede renovarse a menudo. La tapa se atornilla primero a mano, y luego se aprieta con una llave de brazos que acompaña a la bomba. Es perjudicial apretar más de lo necesario.



Figura 1. Calorímetro de bomba con unidad de ignición

En el interior de la bomba se encuentra la cápsula del combustible, la cual puede ser de diferentes tipos. Las cápsulas de platino de forma plana (bordes bajos) sólo son apropiadas para sustancias de pronta combustión. Para sustancias de escasa velocidad de combustión se utilizan cápsulas de materiales poco conductores de calor y bordes altos (cuarzo, porcelana o arcilla refractaria no vidriada). La bomba se llena con oxígeno por medio de un tubo flexible y delgado de cobre, provisto de un manómetro, terminado de un lado en una tuerca que se adapta a las aberturas de llenado de la bomba, y por el otro por una boquilla que se ajusta a la rosca normal de las botellas de oxígeno. Se abre la botella y se deja pasar el oxígeno hasta que el manómetro señale algo más de 25 atm. Se cierra primero la botella de oxígeno y después la bomba cuando el manómetro desciende a 25 atm ya que las tuberías nunca son absolutamente herméticas. debe tomarse como norma llenar de oxígeno la bomba en último término y dar salida al gas inmediatamente después de realizado el ensayo; es decir, la bomba no debe estar bajo presión más que el tiempo absolutamente indispensable.

La parte exterior está formada por un depósito de agua de forma anular que contiene de 15 a 25 litros, y que por su gran capacidad térmica constituye el ambiente del calorímetro y lo protege de cambios de calor. Sobre este depósito va montado un soporte que sostiene los mecanismos de accionamiento del agitador, así como la suspensión elástica del termómetro.

Se puede emplear un agitador de hélice, con el cual se debe modificar la disposición del aparato. El depósito exterior de agua tiene la misma forma, pero mayor diámetro y capacidad. En este ensanchamiento va colocado el canal de agitación (canal de la hélice). Ésta toma el agua caliente de la parte superior y la impulsa por la parte inferior.

La bomba no necesita estar centrada en el depósito del calorímetro, sino que deberá estar en la proximidad inmediata al canal de agitación , con el fin de que la velocidad de circulación en el punto más alejado de la hélice sea lo más reducida posible. Una de las ventajas de esta disposición es que ni el termómetro ni la bomba están en contacto inmediato con el agitador, y por consiguiente, éste trabaja

absolutamente sin choques o rozamientos.

Para la medición de temperaturas se empleará un termómetro de mercurio con una amplitud de 14 a 23°C construido especialmente para este caso. La longitud de los grados de estos termómetros es de 3 a 4,5 cm. y están divididos en 100 partes, lo que permite llegar a apreciar incluso la milésima de grado haciendo las lecturas con lupa.

La cantidad de calor medida indirectamente al efectuar la determinación calorimétrica es el producto de la diferencia de la temperaturas corregidas por la capacidad térmica del calorímetro llamada esta última *equivalente de agua*. Se comprende con esta denominación la cantidad de calor necesaria para elevar en 1.00 °C la temperatura de todo el sistema. La manera más exacta para producir y calcular esta cantidad de calor es

utilizar el método eléctrico, el cual consiste en rodear la bomba con una resistencia calefactora. Generalmente por comodidad se calcula el equivalente

por el método de combustión en el cual se utilizan productos químicos puros de calor de combustión conocidos.

Lo mismo que en el ensayo calorimétrico ordinario, al efectuar la determinación del equivalente del calorímetro, además del calor de combustión de la sustancia patrón, se deben tomar en cuenta otros factores :

- a) La inflamación del filamento metálico empleado. La pequeña cantidad de corriente que se invierte en el encendido puede despreciarse o introducirse en el valor del equivalente.
- b) El calor de formación del ácido nítrico. Para evitar la formación del mismo es recomendable hacer lavados con oxígeno para desalojar de la bomba la mayor cantidad de aire posible.
- c) Para realizar los cálculos calorimétricos se realizan una serie de correcciones tal como la corrección por radiación que permite obtener la elevación verdadera de la temperatura basándose en la hipótesis de que hasta el punto en que el termómetro ha recorrido la mitad del camino en su ascenso, el cambio de calor es igual del que se calcula como consecuencia del movimiento del termómetro en las fases inicial y final. En todos los minutos siguientes, las temperaturas están tan cerca de la temperatura máxima, que el cambio de calor es el mismo que resulta de la marcha del termómetro en la fase final del ensayo.
- d) Otro tipo de corrección es la determinación de los ácidos sulfúrico y nítrico por volumetría utilizando el método de Langbein.

El conocimiento de los valores de calor de combustión es importante a nivel industrial principalmente en el empleo de calderas, las cuales se establece un intercambio de calor entre los gases de combustión de algún combustible ,como el disel o la gasolina, y el agua. El cálculo de la eficiencia de la caldera requiere el valor del calor de combustión, para conocer cuanto de la energía disponible en el combustible se transfiere al agua.

Equipo y Diagrama Experimental

Cuadro 1. Equipo experimental

Equipo	Fabricante	Placa U.C.R.
Calorímetro de bomba	Parr	4764
Unidad de ignición	Parr	124660
Empastillador	Parr	120762
Termómetro	Cole Parmer	08003-10
Cronómetro	Accusplit	126541

Cuadro 2. Reactivos utilizados.

Sustancia	Fabricante	Calidad
Ácido Benzoico	FLUKA AG	Reactivo
Broza de café (B111003)	CITA	_____

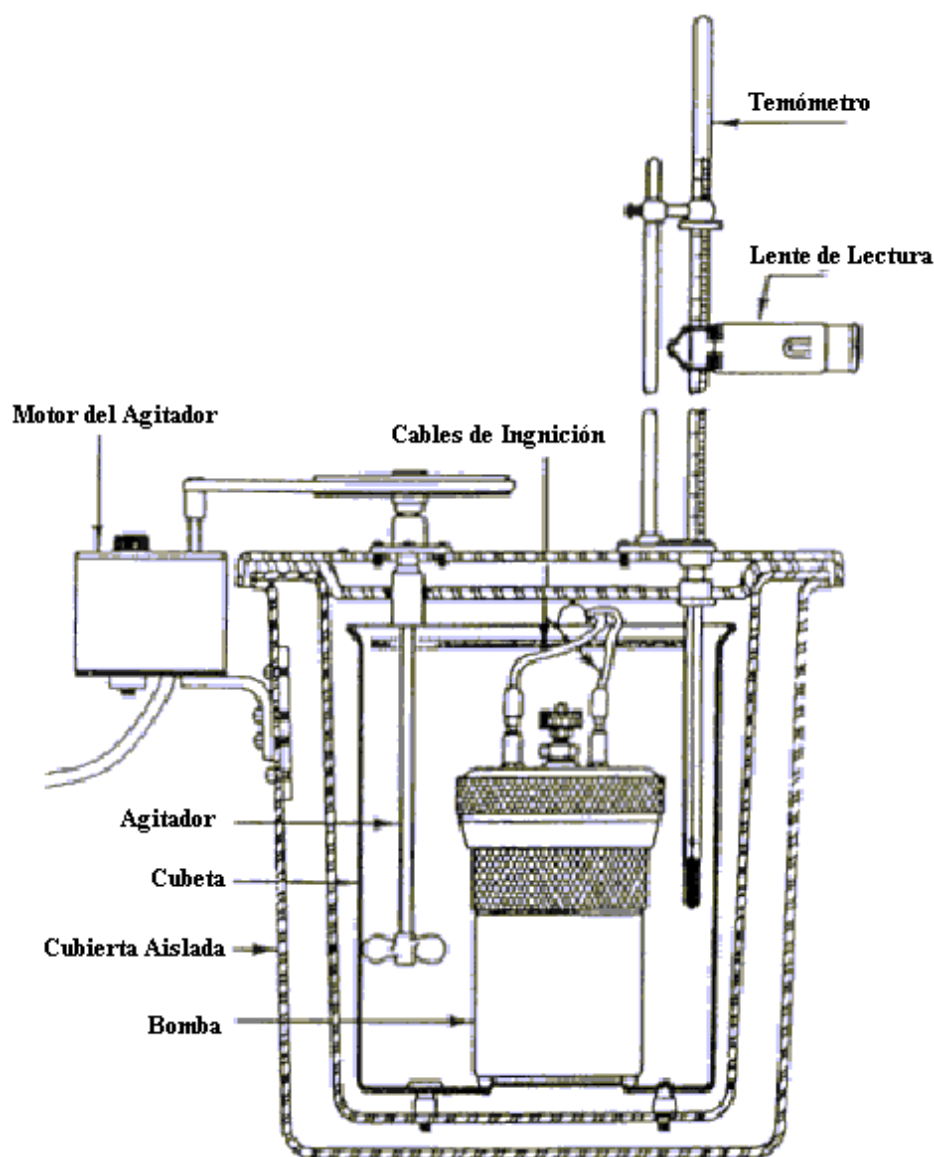


Figura 2. Diagrama del calorímetro de bomba y sus partes principales.

Metodología

Se procede a la determinación del calor de combustión de varias muestras de residuos de broza de café, las cuales tienen un 25% de humedad. Para lo cual primeramente se determina la capacidad calorífica del calorímetro, por medio del uso de una sustancia de referencia como lo es el ácido benzoico. Se prepara una pastilla para la combustión de dicha sustancia, y se prepara la bomba calorimétrica de acuerdo a lo estipulado por el diseño del instrumento.

Seguidamente se mide temperatura y tiempo antes, durante y posterior al proceso de combustión, hasta que la temperatura se mantenga constante. Se procede de la misma forma para determinar el calor de combustión de las distintas muestras de broza de café, realizando tres corridas. Los datos necesarios para el cálculo se obtienen a partir de los gráficos de temperatura en función del tiempo, realizados para cada muestra analizada.

El experimento considera como variables de diseño la masa de cada muestra combustionada, así como la longitud del alambre de combustión. Como variable de respuesta se tiene el tiempo y la temperatura, durante el intercambio calórico. Como variables fijas se tiene el volumen de agua utilizado en el calorímetro, la presión atmosférica y la presión en la bomba de oxígeno.

Discusión de Resultados

Se determinó el calor de combustión para varias muestras de broza de café, utilizando ácido benzoico como sustancia de referencia, para calibrar el calorímetro.

El calor de combustión que se genera al quemar la sustancia en presencia de oxígeno dentro de la bomba se expresa principalmente de dos formas: como el calor que gana el calorímetro y la cantidad de calor que gana el agua. La sustancia de referencia se utiliza para determinar el calor ganado por el calorímetro como la diferencia del valor de calor de combustión de la sustancia patrón y el calor que absorbe el agua. Los valores necesarios para determinar el calor ganado por el calorímetro, es decir, su capacidad calorífica, se obtienen a partir del gráfico de temperatura contra tiempo para el proceso de combustión y utilizando las fórmulas preestablecidas para el tipo de calorímetro utilizado. La gráfica correspondiente se observa en la figura 3.

Figura 3. Variación de la temperatura con el tiempo durante la combustión del ácido benzoico.

Se obtuvo un valor de 9135.7 J/°C para la capacidad calorífica del calorímetro. Una vez determinado este parámetro, se calculó el valor del calor de combustión para tres muestras de broza de café (B111003) con un 25% de humedad. Nuevamente, los parámetros necesarios para el cálculo se determinan a partir de la curva temperatura contra tiempo, la cual se muestra en la figura 4.

Figura 3. Variación de la temperatura con el tiempo durante la combustión de las distintas muestras de broza de café.

A partir de la información proporcionado por las curvas de la figura 4, y utilizando el valor de la capacidad calorífica del calorímetro obtenido a partir de la combustión del ácido benzoico, se obtiene el calor de combustión para las distintas muestras de broza de café. Los resultados se observan en el siguiente cuadro.

Cuadro 3. Valores para el calor de combustión de las distintas muestras de broza de café

Muestra	Calor de combustión
	H, J/g
1	12034.3
2	
3	
Promedio	10780.2

Es importante señalar en este punto las suposiciones realizadas para obtener estos valores. Primeramente, se observa de la figura 4 que las muestras se queman muy rápido en la bomba; el intervalo de tiempo previo a la ignición y la razón de cambio de la temperatura en dicho intervalo, parámetros necesarios para calcular el calor de combustión, se han estimado de una forma aproximada solamente, ya que se cuentan con pocos pares de datos. En las gráficas realizadas se observa como las sustancias parten de la temperatura ambiente a la que se encontraba el agua antes de la combustión. A medida que se realiza la reacción comienza el intercambio del calor, que se genera dentro de la bomba de oxígeno, con su alrededor inmediato, en este caso el agua, la cual comienza a aumentar la temperatura. El flujo calórico disminuye a medida que se establece el equilibrio térmico entre los dos sistemas. Es importante mencionar que se hizo solamente la corrección debida al calor de combustión del alambre utilizado, ya que de la literatura se conocía el factor de corrección y en el laboratorio se determinó la longitud de alambre quemado. Otras correcciones que debían realizarse, debidas principalmente a la formación de ácido nítrico y sulfúrico durante el proceso de combustión, se omitieron

debido a la imposibilidad práctica de estimar con exactitud la cantidad de ácido nítrico y sulfúrico formados.

Otro punto importante a señalar es que los cambios de energía asociados con la reacción de combustión se miden a temperatura y volumen constante. En el laboratorio se utilizaron 1200 ml de agua, los cuales, asumiendo que la densidad del agua es 1g/ml, equivalen a 1200 g. Se utiliza esta cantidad ya que con esta se tapa la bomba a un nivel por debajo de las entradas de los electrodos, para así evitar el posible contacto de la electricidad con el agua. Además no se efectúa trabajo, aunque en la determinación participen gases, ya que el cambio de volumen es igual a cero.

Como no se dispone de datos teóricos para comparar con los valores de calor de combustión obtenidos para la broza de café, se realiza el análisis estadístico comparando la diferencia de los valores obtenidos con respecto al valor promedio. Los respectivos valores se muestran en el siguiente cuadro

Cuadro 4. Diferencias de los valores de calor de combustión respecto al promedio

Muestra	Diferencia respecto al promedio, d (J/g)
1	
2	159.7
3	1094.4

Se establece como hipótesis nula que no existe diferencia estadísticamente significativa de los valores respecto a su promedio, mientras la hipótesis alterna plantea lo contrario, es decir, sí existe diferencia. Utilizando la distribución t de student con dos grados de libertad y un nivel de significancia del 5%, se obtienen los valores tabulados en el cuadro 5.

Cuadro 5. Valores requeridos para la determinación del nivel de significancia de la hipótesis planteada.

Definición	Valor
Promedio de las diferencias	
Desviación estándar de las diferencias, s	
Valor de t calculado, t _{calc}	
Valor de t tabulado, t _{teo}	729.6
Probabilidad, Pr (t _{calc})	499.9
Probabilidad, Pr (t _{teo})	2.528
Criterio sobre hipótesis nula	4.303

Como el valor de t calculado es menor que el valor de t tabulado, no hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula al nivel de significancia del 5%. Es importante recalcar que la prueba estadística solamente comprueba la validez del promedio de los datos, como un estimado del calor de combustión para la muestra de broza de café, sin embargo, se desconoce si este valor es el real. Sería recomendable efectuar una mayor cantidad de corridas, ya que tres valores no son suficientes para establecer un criterio respecto a la validez del método seguido. También podría compararse con el valor de calor de combustión de alguna

sustancia conocida y con características similares, aunque sea sólo parcialmente.

Entre las principales fuentes de error cometidas se pueden señalar las siguientes:

- No se tomaron suficientes medidas de temperatura y tiempo antes de la ignición, lo cual afecta los cálculos y se dificulta debido a la rapidez con que se quema la broza de café.
- Para ver la temperatura en el termómetro de la bomba era necesaria una lupa y mucha precisión por lo que estas mediciones pueden variar según el observador.
- No se tomó en cuenta el residuo observado en la cápsula después del proceso de combustión, además se desconoce su naturaleza.
- Se desconoce si el valor obtenido para la capacidad calorífica del calorímetro es el correcto, ya que no se comparó con ningún otro valor, experimental o teórico.

Conclusiones y Recomendaciones

- El aumento de la temperatura del agua a medida que se da la reacción tiende hacia un valor constante debido a que el flujo calórico es consecuencia del gradiente de temperatura entre los dos sistemas. Por esto cuando se establece el equilibrio, dicho gradiente es igual a cero y la temperatura se mantiene constante.
- Las correcciones necesarias por formación de sustancias tales como ácido nítrico o sulfúrico, deben realizarse solamente si se puede estimar la cantidad de dichas sustancias formadas, de lo contrario es más recomendable omitirlas que hacer aproximaciones empíricas.
- Basándose solamente en lo observado experimentalmente, no se recomienda la broza de café como combustible, ya que estando seca, se quema muy rápido, mientras que estando muy húmeda no se quema o no lo hace de forma completa.
- Se recomienda usar una cantidad de agua en el calorímetro no menor a un litro, ya que una cantidad grande facilita el intercambio calórico y que el mismo no sea muy rápido.
- Es importante asegurarse que haya cantidad de oxígeno suficiente en la bomba para que se dé la combustión completa.
- Se recomienda tomar suficientes mediciones antes y después de la ignición con el fin de facilitar los cálculos.

Bibliografía

- Smith, J.M. *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química*. 5 edición, McGraw-Hill, México, 1995.
- Van Wylen, G. *Fundamentos de Termodinámica*. 2 edición. Limusa, México, 1999.
- Perry, J.H. *Chemical Engineering Handbook*. 7° Edición, McGraw-Hill, 1998.
- Box, George; Hunter William. *Estadística para investigadores*. Editorial Reverté, S.A., España 1993.

Nomenclatura

Cuadro 6. Nomenclatura utilizada en el informe.

Símbolo	Significado	Unidades
E	Energía	J
Q	Calor	J

W	Trabajo	J
U	Energía Interna	J
C	Capacidad calorífica	J/°C
T	Temperatura	°C
	Diferencial parcial	adim
H	Entalpía	J
P	Presión	Pa
t	Tiempo	s
q	Calor	J

Cuadro 6.(cont.) Nomenclatura utilizada en el informe.

Símbolo	Significado	Unidades
x	Longitud	m
k		
m	Conductividad	W/mK
r		
Superíndices	Masa	g
2	Pendiente	Potencia cuadrada
Subíndices		°C/s
a	Después de la ignición	
b		
c		

Datos Experimentales

Cuadro 7. Masa de las pastillas utilizadas para la combustión (masa pastilla más alambre de ignición), antes y después de la combustión.

Sustancia	Ácido Benzoico	Broza de café			2	3
				1		
Masa, m (g) antes	1.0867	1.0371	0.8210	0.9685		
Masa, m (g) después	0.0000	0.0432	0.0340	0.0420		

Cuadro 8. Longitud de alambre antes y después de la combustión.

Sustancia	Ácido Benzoico	Broza de café			1	2	3
Longitud, l(cm) antes							
Longitud, l(cm) después							
	10	10	10	10			
	6.7	5.4	6.0	3.3			

Cuadro 9. Temperaturas cada 5 segundos para las diferentes muestras.

Ácido Benzoico	Broza de café			Corrida 3
		Corrida 1	Corrida 2	
21,42				
21,42	21,74	21,78	21,22	
21,44	21,76	21,78	21,23	

Cuadro 9.(cont.) Temperaturas cada 5 segundos para las diferentes muestras.

Ácido Benzoico	Broza de café			Corrida 3
		Corrida 1	Corrida 2	
21,54	21,78	21,80	21,24	
21,70	21,86	21,83	21,28	
22,00	21,98	21,90	21,36	
22,30	22,20	21,98	21,40	
22,70	22,30	22,00	21,64	
23,10	22,50	22,08	21,78	
23,40	22,66	22,16	21,78	
23,60	22,80	22,30	21,88	
23,70	22,90	22,36	22,00	
23,90	23,00	22,42	22,06	
24,04	23,08	22,50	22,18	
24,20	23,16	22,57	22,24	

24,34	23,18	22,63	22,30
24,40	23,20	22,69	22,36
24,44	23,26	22,74	22,40
24,48	23,30	22,79	22,44
24,46	23,32	22,83	22,50
24,48	23,33	22,86	22,55
24,56	23,34	22,90	22,58
24,56	23,35	22,94	22,63
24,62	23,37	22,96	22,65
24,68	23,40	22,98	22,68
24,72	23,42	23,00	22,70
24,74	23,43	23,03	22,73
24,76	23,48	23,06	22,74
24,80	23,51	23,07	22,77
24,82	23,52	23,09	22,78
24,86	23,52	23,11	22,80
24,90	23,54	23,13	22,82
24,94	23,54	23,15	22,84
24,96	23,56	23,17	22,85
24,96	23,58	23,19	22,87
24,98	23,59	23,20	22,88
25,00	23,60	23,21	22,91
25,04	23,61	23,22	22,92
25,08	23,62	23,24	22,93
25,08	23,63	23,24	22,95
25,10	23,65	23,26	22,96

25,12	23,66	23,27	22,97
25,14	23,67	23,28	22,98
25,14	23,69	23,30	22,99
25,16	23,70	23,31	23,00
25,18	23,71	23,32	23,01

Cuadro 9. (cont.) Temperaturas cada 5 segundos para las diferentes muestras.

Ácido Benzoico	Broza de café			Corrida 3
		Corrida 1	Corrida 2	
25,20				
25,24				
25,24				
25,26				
25,26				
25,27				
25,28			23,03	
25,30			23,04	
25,32		23,33	23,04	
25,33	23,72	23,34	23,05	
25,36	23,72	23,36	23,06	
25,36	23,73	23,37	23,07	
25,36	23,74	23,38	23,07	
25,36	23,75	23,38	23,08	
25,36	23,76	23,39	23,09	
	23,77	23,40	23,10	
	23,78	23,41	23,10	

Resultados Intermedios	23,80	23,42	
			23,11
	23,81	23,42	
			23,12
	23,82	23,43	
			23,13
	23,84	23,44	
			23,14

Cuadro 10. Datos para el cálculo de la capacidad calorífica de la bomba de oxígeno y el calor de combustión de la broza de café

Parámetro	Ácido Benzoico	Broza de café				2	3
				1			
r1 (°C/s)							
r2 (°C/s)							
a (s)							
b (s)							
c (s)							
ta (°C)	0,002	0,0028	0,0024	0,0014			
tb (°C)	0,0028	0,0022	0,0021	0,0018			
tc (°C)	10	20	25	20			
e (J)	45	50	65	75			
t (°C)	195	175	175	185			

Muestra de Cálculo 21,44 21,86 21,90 21,28

1. Cálculo de la capacidad calorífica del calorímetro. 23,40 22,80 22,50 22,30

Se calcula utilizando la siguiente fórmula: 25,08 23,59 23,20 22,92

(12) 31,76 44,27 38,49 64,48

Donde t se calcula como sigue: 3,15 1,371 0,973 1,365

(13)

Los valores de r1 y r2 se obtuvieron mediante una regresión lineal utilizando Excel 2000 y los datos del cuadro 9, filas 1–3, columna 1, obteniéndose los valores del cuadro 10, filas 1–2, columna 2. Con los datos del cuadro 10, filas 1–8, columna 2 y sustituyendo en la ecuación (13), se obtiene el valor del mismo cuadro, misma columna, fila 10:

Para calcular e1 (corrección debida al alambre combustionado) se utiliza la siguiente ecuación:

(14)

Con los valores del cuadro 8, filas 1–2, columna 2 se obtiene el valor del cuadro 10, fila 9, columna 2:

Sustituyendo en (12) los valores del cuadro 10, filas 9–10, columna 2; cuadro 7, fila 1, columna 2 y el valor del calor de combustión para el ácido benzoico (26452.2 J), se obtiene:

2. Cálculo del calor de combustión para las muestras de broza de café.

Se realizó utilizando la siguiente fórmula:

(15)

Para la muestra 1, con los valores del cuadro 10, filas 9–10, columna 3; cuadro 7, fila 1, columna 3 y el valor de C calculado anteriormente, se obtiene el valor del cuadro 3, fila 1, columna 2:

Se procede de igual forma para calcular los demás calores de combustión.

3. Análisis estadístico de los datos obtenidos

Se plantea una prueba de hipótesis, para las diferencias de los valores del calor de combustión obtenidos respecto a su Llamando a la diferencia esperada entre los valores y d las diferencias obtenidas experimentalmente y tabuladas en el cuadro 4, filas 1–3, columna 2 se plantea:

$$H_0 : \delta = 0$$

$$H_1 : \delta \neq 0$$

Primeramente, se calculan los promedios de las diferencias obtenidas, mediante la siguiente ecuación:

(16)

para los valores del cuadro 4, filas 1–3, columna 2 se obtiene el valor del cuadro 5, fila 1, columna 2:

El cálculo de la desviación estándar, se realiza utilizando la siguiente ecuación:

(17)

Utilizando los valores del cuadro 4, filas 1–3, columna y del cuadro 5, fila 1, columna 2, se obtiene el valor del cuadro 5, fila 2, columna 2:

El valor de t calculado, t_{calc}, se obtiene mediante la siguiente fórmula:

(18)

Con los datos del cuadro 5, filas 1 y 2, columna 2 se obtiene el valor del mismo cuadro, fila 3, columna 2:

El valor de t_{teo}, el cual se obtuvo de las respectivas tablas de la distribución t de Student con dos grados de libertad; se encuentra en el cuadro 5, fila 4, columna 2.

Como el valor de t teórico, t_{teo}, es mayor que el valor de t calculado, t_{calc}, no hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula.

Procedimiento Experimental

a. Calibración de la muestra.

- Pese la muestra del material en la balanza analítica. La muestra no debe ser mayor de 1.1 gramos
- Prepare la pastilla de acuerdo a lo estipulado en el manual.
- Instale el alambre (que se utiliza en la combustión de la pastilla), tal que se cierre el circuito. Se recomienda no mayor de 10cm.
- Coloque la pastilla en la cápsula y coloque el alambre sobre la misma sin

que toque el alambre de la cápsula.

- Cierre herméticamente la bomba de oxígeno.
- Realice 2 lavados con el oxígeno, y llene la bomba con oxígeno a una presión no mayor a las 25 atmósferas.
- Introduzca la bomba de combustión en el calorímetro, conectando los electrodos del detonador y haciendo funcionar éste, luego de revisar que todo el sistema se encuentre en orden.(Tener desconectado el detonador por peligro de una descarga eléctrica).
- Mida temperatura y tiempo para el transcurso del intercambio calórico. Hasta que la temperatura se encuentre constante.
- Abra la válvula para la salida de los gases de combustión antes de abrir la bomba de oxígeno.
- Mida la longitud del alambre no combustionado, así como los residuos de muestra no combustionada.

b) Determinación del calor de combustión

- Confeccionar tres pastillas con el equipo que se localiza en el laboratorio.
- Instale el alambre (que se utiliza en la combustión de la pastilla), tal que se cierre el circuito. Se recomienda no mayor de a los 10cm.
- Coloque la pastilla en la cápsula y coloque el alambre sobre la misma sin que toque el alambre de la cápsula.
- Cierre herméticamente la bomba de oxígeno.
- Realice 2 lavados con el oxígeno, y llene la bomba con oxígeno a una presión no mayor a las 25 atmósferas.
- Introduzca la bomba de combustión en el calorímetro, conectando los electrodos del detonador y haciendo funcionar éste, luego de revisar que todo el sistema se encuentre en orden.(Tener desconectado el detonador por peligro de una descarga eléctrica).
- Mida temperatura y tiempo para el transcurso del intercambio calórico. Hasta que la temperatura se encuentre constante.
- Abra la válvula para la salida de los gases de combustión antes de abrir la bomba de oxígeno.
- Mida la longitud del alambre no combustionado, así como los residuos de muestra no combustionada.
- Limpie el equipo y entréguelo.