

Transformando la educación de la ingeniería química a través de laboratorios remotos: Experiencia de implementación en los cursos de balance de material y energía y termodinámica a nivel licenciatura

Transforming chemical engineering education through remote laboratories: Implementation experiences for Mass / Energy Balance and Thermodynamics undergraduate courses

Enrique Ortiz*, Darinka Ramírez and Manuel Macías
Escuela de Ingeniería y Tecnologías de Información,
Tecnológico de Monterrey, Monterrey, MEXICO

* eortiz@itesm.mx

Resumen

Se diseñó y construyó un equipo experimental para el estudio del comportamiento de los gases. Este equipo cuenta con tecnología que le permite una operación remota, lo cual hace posible su utilización a través de una conexión a internet. Se diseñaron tres procedimientos experimentales para aplicarse en este equipo: 1) estudio del comportamiento presión-temperatura para un gas a condiciones de volumen constante; 2) visualización del comportamiento de un gas en un diagrama temperatura-entropía; y 3) balance de energía para un sistema cerrado en régimen no permanente para un gas. Estos tres experimentos fueron diseñados para su implementación en los cursos de nivel licenciatura de balance de materia, balance de energía y termodinámica respectivamente. El laboratorio remoto ha demostrado su utilidad como herramienta de enseñanza en el campo de la ingeniería al facilitar dentro de un salón de clases el “aprender haciendo”, sin tener la necesidad de impartir la clase en un laboratorio. Un laboratorio remoto como este, tiene el potencial para llevar la experimentación a prácticamente cualquier lugar en el planeta, siempre y cuando se cuente con una conexión a internet.

An experimental device for the study of gas behavior was designed and constructed. This device was provided with the technology necessary for remote operation, having the capability to fully operate through an internet connection. A total of three different experiments were designed for this device: 1) Study of the pressure-temperature behavior for a gas under constant volume conditions; 2) Behavior of a gas in a temperature-entropy diagram; and 3) Energy balance for a non-steady state closed system with gases. These experiments were implemented at undergraduate level for the courses Mass balance, Thermodynamics and Energy balance. The remote laboratory proved to be a useful tool for teaching engineering topics at the classroom “by doing” without taking the class to a laboratory facility. Remote laboratory equipment such as this, has the potential to take laboratory experience to anywhere in the world where an internet connection is available.

Palabras clave: laboratorio remoto, innovación, educación, ingeniería

1 Introducción

El proceso de enseñanza-aprendizaje relacionado con las ingenierías requiere de la aplicación práctica de los conceptos y fundamentos teóricos de la disciplina. Esta necesidad comúnmente se satisface con la incorporación de cursos de laboratorios dentro del programa de estudios. Lo anterior implica la necesidad de una instalación de laboratorios disponible para la impartición de estos cursos. Aunado a lo anterior, es común entonces tener una separación entre cursos teóricos y cursos prácticos, siendo difícil para un profesor de un curso teórico poder explicar o lograr la demostración de los conceptos del curso de una forma práctica. Una alternativa en estos casos, es que en algunas sesiones de la clase teórica se lleve al grupo a un laboratorio donde se hagan las demostraciones prácticas, pero nuevamente, la disponibilidad de una instalación de este tipo se vuelve crítica.

La incorporación de laboratorios remotos plantea una alternativa a la problemática descrita anteriormente. Un equipo experimental remoto es un dispositivo totalmente automatizado que permite su operación a distancia. El uso de este tipo de laboratorios abre la posibilidad de llevar a cabo el experimento a cualquier hora y en cualquier lugar, siempre y cuando se cuente con acceso al laboratorio remoto vía internet.

Este trabajo presenta los resultados obtenidos en el diseño y construcción de un equipo de laboratorio remoto para el estudio del comportamiento de los gases. El trabajo presenta tres propuestas de experimentos que se pueden realizar en este equipo y los resultados que se obtienen con el mismo.

2 Materiales y Métodos

2.1 Diseño y construcción del equipo

El equipo consiste en un recipiente esférico de metal con un volumen de 0.59 L, el cual cuenta con una válvula, un medidor de presión y un termopar para la medición de temperatura. El recipiente se llena con cierta cantidad de aire (en este caso fue el gas seleccionado para el estudio). La presión del gas cargado en el recipiente a temperatura ambiente es de aproximadamente 2 kg/cm² manométricas. El recipiente se encuentra dentro de una manta eléctrica de calentamiento, la cual está conectada a un sistema de control de temperatura, el cual tiene como objetivo el no

permitir que la temperatura alcanzada durante el experimento exceda un valor predeterminado.

Esta función es para fines de seguridad y no se pretende con el mismo el control de la temperatura del gas. El mismo controlador de temperatura se utiliza como pantalla para indicar la temperatura dentro del recipiente.

El equipo experimental se encuentra interconectado con una computadora a través de una tarjeta PCI que permite tanto la adquisición de datos, como la manipulación del encendido/apagado del equipo desde la computadora. Adicionalmente, el equipo cuenta con una cámara de video digital con capacidad para transmisión vía internet de la señal de video. Tanto la computadora como la cámara de video se encuentran conectadas a internet por medio de puertos Ethernet con IP fijo.

La cámara de video se opera también desde la computadora y permite la observación general del equipo experimental, así como la visualización de los indicadores de temperatura y presión.

La Figura 1 presenta una vista general del equipo experimental construido.

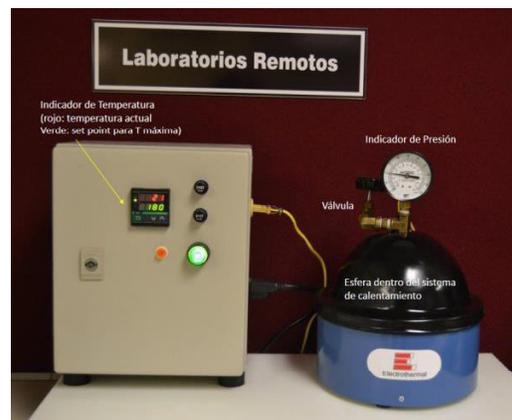


Figura 1. Vista del equipo experimental (no se muestran la computadora y la cámara de video).

2.2 Diseño de los experimentos para clase

A continuación se presentan los tres procedimientos experimentales diseñados para las diferentes materias donde apoyará el equipo remoto.

2.2.1 Comportamiento presión-temperatura de un gas a volumen constante.

Objetivo: Observar el comportamiento que sigue la presión de un gas al variar la temperatura en un sistema cerrado a volumen constante y compararlo con el comportamiento teórico de la teoría de gases ideales

Materia y nivel: Balance de Materia (IQ1001), primer tercio de licenciatura en ingeniería química.

Marco teórico: En la teoría del comportamiento del estado gaseoso, se establece que la presión de un gas ideal es directamente proporcional a la temperatura a la que se encuentra si el volumen del recipiente que lo contiene permanece constante. Esto implica que para un gas ideal, si se grafican los valores de presión que tiene el gas a diferentes temperaturas, se debería observar un comportamiento lineal [1] si el volumen permanece constante.

La ecuación del gas ideal predice un comportamiento de acuerdo a la ecuación 1.

$$PV = nRT \quad (1)$$

Donde:

P: presión absoluta

V: volumen

n: número de moles

R: constante universal de los gases

T: temperatura absoluta

Si en un recipiente rígido colocamos una cierta cantidad de gas, los términos V y n son constantes, por lo que si registramos la presión (P) que tiene el gas a diferentes valores de temperatura (T) debemos obtener una relación lineal P-T con pendiente nR/V.

Procedimiento experimental: Haciendo uso del equipo remoto, es posible llevar a cabo un experimento en donde, mediante el calentamiento del gas contenido en la esfera rígida, se puedan registrar los valores de la presión del gas dentro del recipiente a diferentes temperaturas. Las lecturas de la presión y la temperatura se pueden hacer cada cierto intervalo de tiempo (cada 5 minutos por ejemplo) durante un periodo determinado del experimento (por ejemplo 15-20 minutos).

Al estudiante se le solicita llevar a cabo el experimento y recolectar datos de presión-temperatura cada 5 minutos durante un periodo de 15 minutos. Con estos datos, el estudiante deberá preparar una gráfica con los datos de Presión vs Temperatura experimentales y discutir si el comportamiento observado sigue o no el comportamiento teórico para un gas ideal.

2.2.2 Visualización del comportamiento de un gas en un diagrama temperatura-entropía.

Objetivo: Familiarizar al estudiante con el uso de los diagramas temperatura-entropía, al tener que localizar datos experimentales de presión y temperatura en un diagrama temperatura-entropía para el aire. Visualizar si el gas sigue el comportamiento propuesto en el diagrama para una línea de volumen constante y con estos datos, determinar el volumen específico del gas.

Materia y nivel: Termodinámica (IQ2001), primer tercio de licenciatura en ingeniería.

Marco teórico: En un diagrama temperatura-entropía para el aire es posible representar los datos del aire a diferentes condiciones de temperatura y presión. Si el experimento se lleva a cabo a volumen constante (como en nuestro caso), los datos de presión-temperatura medidos experimentalmente deben seguir dentro del diagrama una de las líneas de volumen constante (o volumen específico).

Procedimiento experimental: Para este experimento se utilizan también datos de presión del gas a diferentes temperaturas. Por lo anterior, el procedimiento de operación del equipo es similar al del experimento descrito previamente. La diferencia es la utilización de estos datos en un diagrama temperatura-entropía para el aire.

El experimento termina cuando el estudiante obtiene al menos 10 datos de presión-temperatura para el sistema. Una vez que se tienen al menos 10 datos de presión-temperatura para el aire, el estudiante deberá graficar estos valores en el diagrama temperatura-entropía para el aire. Si el gas sigue el comportamiento esperado, los datos deberán quedar aproximadamente sobre una de las líneas de volumen constante en el diagrama.

El estudiante deberá entregar sus datos graficados en el diagrama junto con una discusión sobre si el comportamiento observado

en el experimento coincide con el predicho por el diagrama.

2.2.3 Balance de energía para un gas en un sistema cerrado en régimen no permanente.

Objetivo: Plantear el balance de energía y su solución, para un recipiente cerrado que contiene un gas y al cual se le suministra una cantidad de energía en forma de calor durante un periodo de tiempo determinado, para determinar si el modelo matemático obtenido representa adecuadamente los datos experimentales que se obtienen para este sistema.

Materia y nivel: Balance de Energía (IQ2000), segundo tercio de la licenciatura en ingeniería química.

Marco teórico: El balance de energía en régimen no estacionario para un sistema como el de nuestro equipo experimental se puede expresar mediante la ecuación 2 [2].

$$Q = \frac{dU}{dt} + nC_v \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

Donde Q representa el calor suministrado al sistema por unidad de tiempo, U es la energía interna del sistema, n es el número de moles de gas en el sistema, C_v es la capacidad calorífica a volumen constante del gas (en este caso se está suponiendo constante para el rango de temperaturas del experimento), T es la temperatura del gas y t es el tiempo transcurrido desde el inicio del experimento.

Este balance se puede resolver si consideramos una condición inicial $T = T_0$ a $t = 0$, para obtener la siguiente expresión para T en función del tiempo.

$$T = T_0 + Qn / C_v t \quad (3)$$

La ecuación 3 predice el comportamiento que tendrá la temperatura del gas en el sistema experimental como función del tiempo transcurrido desde el inicio del experimento.

Procedimiento experimental: Antes de activar el calentamiento en el sistema experimental, se deberán registrar la temperatura a la cual se encuentra el gas. Este valor de temperatura es el valor T_0 . Así mismo debe registrar el valor de la presión del gas. Este valor se utilizará posteriormente para calcular el número de moles de aire contenido en el sistema.

Iniciar el proceso de calentamiento del sistema. Llevar un registro escrito de los valores de temperatura y tiempo transcurrido durante el experimento. Se recomienda registrar el valor de temperatura cada 2 minutos durante un periodo de 15 minutos. Una vez transcurrido este tiempo, debe apagar el sistema experimental.

Al estudiante se le solicita lo siguiente:

- Elaborar un balance de energía en régimen no permanente para el sistema, considerando que la capacidad calorífica del gas se puede suponer constante
- Utilizando los valores de P y T al inicio del sistema, calcule el número de moles de aire contenido en el recipiente. Para este cálculo debe considerar un volumen de 0.59 L para el recipiente.
- Elaborar una gráfica T versus t con los datos experimentales y hacer un ajuste del modelo matemático obtenido en a fin de determinar el valor del flujo de calor suministrado al sistema. Utilice un valor C_v promedio para el rango de temperatura del experimento, utilizando la ecuación de capacidad calorífica reportada en el libro de texto para el aire.
- Discuta si el modelo matemático predice satisfactoriamente los datos observados en su experimento. Justifique numéricamente los argumentos.

3. Resultados, análisis y conclusiones

3.1 Resultados y su análisis

El equipo remoto se utilizó para la obtención de datos experimentales y llevar a cabo los cálculos y procedimientos descritos en los experimentos de la sección anterior. A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los experimentos propuestos.

3.1.1 Comportamiento P-T de un gas ideal

El experimento se inició con una temperatura de 23° C y una presión manométrica de 29.1 psig. Se hicieron un total de 14 lecturas de Presión-Temperatura para el sistema, llegando hasta una temperatura de 176° C con una lectura de presión en el manómetro de 54 psig. En la tabla 1 se presentan los datos experimentales obtenidos con el equipo remoto.

Tabla 1. *Datos de temperatura y presión experimentales*

T (°C)	P (psig)	T (K)
23	44	296.15
26	45	299.15
33	47	306.15
42	49	315.15
51	51	324.15
63	53	336.15
76	55	349.15
90	57	363.15
104	59	377.15
118	61	391.15
133	63	406.15
149	65	422.15
162	67	435.15
176	69	449.15

En la figura 2 se presenta una gráfica de presión versus temperatura en la cual se muestran los datos experimentales junto con el comportamiento esperado para un gas ideal. En esta figura podemos observar que el comportamiento que siguió el aire en nuestro sistema experimental se acerca mucho al comportamiento predicho por la teoría del gas ideal.

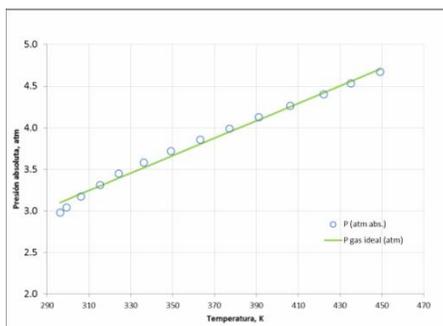


Figura 2. Gráfica P vs T para los datos experimentales y el modelo teórico del gas ideal.

En la figura 2, los datos de presión fueron transformados a presión absoluta (sumando la presión atmosférica a los valores de presión del manómetro) y expresados en unidades de atmósferas (atm).

3.1.2 Comportamiento de un gas en un diagrama temperatura-entropía.

Para este experimento se utilizó un subconjunto de los datos experimentales mostrados en la

tabla 1. La selección de datos se hizo para facilitar la representación gráfica en el diagrama. Las parejas de datos (T, P) seleccionados fueron: (26,45), (51,51), (104, 59), y (149, 65). Estos datos fueron graficados en un diagrama temperatura-entropía para el aire. La figura 3 muestra el diagrama temperatura-entropía para el aire con los datos experimentales obtenidos. En la figura 3 podemos observar que los datos experimentales en el rango de 26° C a 140° C caen aproximadamente sobre la línea punteada que representa el volumen específico del gas. Este comportamiento indica que la condición de volumen constante utilizada en el experimento se está cumpliendo, por lo que los datos experimentales coinciden con lo reportado en el diagrama. Del diagrama se puede entonces obtener que el valor del volumen específico del aire es de aproximadamente 0.25 m³/kg. 3.1.3 Balance de energía para un gas en un sistema cerrado en régimen no permanente

Para este experimento es necesario obtener datos de la temperatura del sistema versus el tiempo transcurrido desde que se inicia el suministro de calor al sistema. En la tabla 2 se presentan los datos experimentales tomados con el equipo remoto para este caso.

Tabla 2. Comportamiento de la temperatura versus tiempo para el sistema experimental

t (min)	T (°C)	T (K)
0.00	23	296.15
3.35	26	299.15
5.75	33	306.15
7.42	42	315.15
8.93	51	324.15
10.47	63	336.15
12.12	76	349.15
13.92	90	363.15
15.63	104	377.15
17.50	118	391.15
19.47	133	406.15
21.88	149	422.15
24.00	162	435.15
26.55	176	449.15

Estos datos fueron graficados y se hizo un ajuste por regresión lineal para obtener los parámetros del modelo representado por la ecuación 3.

La figura 4 presenta el comportamiento de la temperatura del sistema versus el tiempo y muestra en forma de línea el modelo ajustado a los datos. En esta figura podemos observar que aunque hay algo de dispersión de los datos, sobre todo al inicio del experimento, el modelo teórico parece predecir el comportamiento de los datos experimentales. Es posible que los primeros datos presenten error debido a que se inicia con el sistema a temperatura ambiente (frío), y el calor suministrado se puede estar transfiriendo también hacia otros componentes del sistema. Si observamos el comportamiento de los datos experimentales a partir de los primeros 5 minutos de operación, el comportamiento lineal que predice el modelo teórico coincide que lo observado en los datos experimentales.

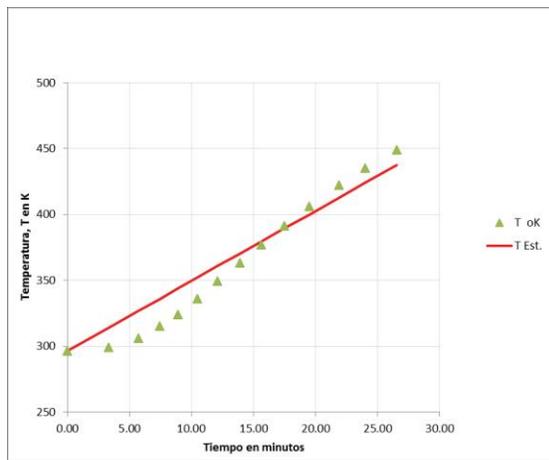


Figura 4. Grafica temperatura versus tiempo para el experimento en régimen no permanente.

4 Conclusiones

El uso de la experimentación para demostrar o reafirmar conceptos teóricos en cursos de ingeniería puede facilitar la comprensión por parte de los estudiantes. En este proyecto, se logró construir un dispositivo experimental con posibilidad de operación remota que permite apoyar al profesor de los cursos de balance de materia, balance de energía y termodinámica en la impartición de los temas relacionados con gases.

Se diseñaron tres procedimientos experimentales que fueron probados en el equipo. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios para todos ellos y demuestran que el dispositivo experimental es capaz de generar datos de calidad. Estos datos se utilizaron exitosamente para demostrar los conceptos teóricos involucrados en cada uno de los temas estudiados.

5. Referencias

- [1] R.M. Felder y R.W. Rousseau, Elementary principles of chemical processes, Third Edition, Wiley, USA (2000).
- [2] D.M. Himmelblau y J.B. Riggs, Basic principles and calculations in chemical engineering, Seventh Edition, Prentice Hall, USA (2004)
- [3] I. Kolin, Thermodynamics Atlas 1, Longmans, (1967).