

MANUAL DEL

LABORATORIO DE

TERMODINÁMICA I

por

Alberto Soria López

Licenciatura en Ingeniería Química
Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa

Mayo de 2002

ÍNDICE

	Pag.
Índice	2
Introducción	3
Instructivo para la Elaboración de Pre-reportes	6
Instructivo para la Elaboración de Reportes	10
Práctica A2. Volumen Específico, Temperatura y Coeficiente de Expansión Térmica para Líquidos	13
Práctica A3. El barómetro y los Manómetros	17
Práctica B. Comportamiento PVT de los Gases Ideales	20
Práctica C. Propiedades PVT de los Vapores	23
Práctica D. Balances Térmicos	27
Práctica E. Balances de Energía Mecánica	30

INTRODUCCIÓN

A LOS ALUMNOS Y ALUMNAS,

El curso de Laboratorio de Termodinámica I tiene el propósito de enseñarte a llevar a cabo experimentos relacionados con los principales conceptos del curso teórico de Termodinámica I, para que puedas verlos ilustrados en algunos sistemas, muchas veces sencillos; que puedas desarrollar algunos modelos que representan los procesos de sistemas en equilibrio termodinámico, a partir del conocimiento de los dispositivos de laboratorio diseñados y existentes para la realización de dichas experiencias, cuyas principales características deberás descubrir para generar un modelo físico conceptual simple del proceso en cuestión, de modo que la aplicación de tus conocimientos teóricos te permita establecer y comprobar las relaciones pertinentes. Luego habrás de identificar, a partir de dichas relaciones, cuáles son los datos de laboratorio que deberás tomar, los parámetros físicos, químicos y geométricos que deberás conocer, así como otra información pertinente que deberás buscar, tanto en el laboratorio como en la biblioteca. Una vez que has cumplido esta etapa, estás en la posibilidad de diseñar tu experimento: elegir un material o sustancia, elaborar un formato de "**Hoja de datos de laboratorio**" que contenga **toda** la información requerida por el experimento, planear la secuencia de las actividades a desarrollar en el transcurso del mismo, previendo cuales serán los instrumentos periféricos de servicio y de medición que vas a requerir. Estas son las actividades que te permitirán realizar una experiencia de laboratorio ilustrativa y estimulante, son tu preparación para obtener el máximo de tu trabajo experimental. En el pre-reporte de la práctica incluirás todos los aspectos arriba señalados, para mostrar que te has preparado convenientemente para llevar a cabo la experiencia.

La realización misma del experimento te brindará otras experiencias, aprenderás a "mover las manos", pero también es muy importante que agudices todos tus sentidos, que aprendas a observar y relacionar lo que sucede en tu sistema y sus alrededores, que interpretes lo que observas de acuerdo a tus conocimientos adquiridos a través de tus estudios y si lo crees conveniente pruebes mejoras al sistema, tratando de obtener los mejores resultados. Con esto quiero decir que trates de saber por ejemplo, si tu sistema es realmente isotérmico, si está bien agitado, si causas las mínimas perturbaciones posibles al tomar las lecturas con tus instrumentos, si no existen gradientes de presión o densidad indeseables que podrían inducir algún efecto indebido, etc... Hacerte preguntas en este sentido te formarán como profesional cuidadoso y serio en su trabajo y te permitirán obtener buenos resultados y la satisfacción de conocer un poco más del comportamiento de los materiales y sistemas de la ingeniería. En esta etapa anotarás todos los datos en tu hoja de datos de laboratorio y todas las observaciones que consideres importantes, ocurridas en el transcurso del experimento.

La tercera etapa es tan importante como las dos previas. Con tus datos de laboratorio deberás encontrar los parámetros o funciones deseadas. Cuidarás en el reporte de tus resultados el análisis de las incertidumbres. Esto te permitirá acotar la validez de tus conclusiones y sugerencias. El **reporte final es el producto íntegro de tu trabajo** en cada práctica. Deberás cuidar que refleje la calidad y la cantidad del trabajo realizado y que muestre la variedad y riqueza de tus experiencias asociadas al desarrollo de la práctica. Por ello

deberás incluir la mayor parte de las secciones que se te solicitaron en el pre-reporte, pero ahora incorporando tanto las observaciones marcadas por el profesor, como los aspectos que ahora, después de haber concluido las actividades manuales de la práctica, consideres convenientes. Al escribir el reporte final deberás poner énfasis en la claridad, para lo cual deberás tener en mente cuáles son los objetivos de la práctica y los logros de la misma. Además deberás resaltar aquellos aspectos que consideras que podrían hacer original o distinta la realización de tu práctica con respecto a lo que podría ser lo usual, por ejemplo si usaste una sustancia que tú propusiste, si empleaste algún método alternativo para medir alguna variable o si desarrollaste alguna explicación interesante para algún comportamiento observado, que hayas podido comprobar que fue importante para obtener mejoras en tus resultados, etc... Esto da una idea de la creatividad con la que has abordado la tarea. Deberás tener presentes a los potenciales lectores del reporte, para que al leerlo reciban la impresión deseada, esto es, **que puedan apreciar el valor de tu trabajo**. Por ahora esto es importante para que tu evaluación sea acorde con la calidad de la experiencia adquirida y en el futuro esta habilidad significará mucho para tu desarrollo profesional.

Otra faceta importante es la realización del trabajo en equipo. Este es un aspecto importante en tu formación profesional. Un equipo bien integrado discute cada una de las actividades, toma acuerdos sobre la manera de realizarlas y las lleva a cabo comunicándose y discutiendo las diversas experiencias, de manera que el reporte resulta un escrito integrado y no meramente un fardo de pequeñas secciones sin un hilo conductor ni coherencia interna. **El trabajo en equipo es una actividad profesional** que puede ser mas estimulante cuando hay una buena relación entre los integrantes del equipo, pero aún si ese no es el caso, el logro de los objetivos debería ser un aliciente suficiente para llevar a buen término el trabajo. No siempre es posible trabajar únicamente con las personas más afines a nuestra manera de ser.

SEGURIDAD

Hay normas de seguridad que deben cumplirse estrictamente para evitar accidentes en el laboratorio. El Consejo Divisional de la División de CBI ha aprobado un **Reglamento de Seguridad en los Laboratorios de Docencia**, que en esta etapa de tu carrera ya debes conocer. Este reglamento está disponible para su consulta en el mismo laboratorio y es necesario que estés al corriente de su contenido, por lo cual, si no lo has leído o no lo recuerdas, es conveniente que lo solicites y comprendas antes de iniciar tu trabajo experimental. A manera de un recordatorio mencionaré a continuación algunos de los puntos más importantes.

1. El uso de bata en el laboratorio es obligatorio cuando se realizan experimentos. Para realizar algunas manipulaciones de sustancias químicas también deben usarse guantes, lentes protectores y mascarillas. Para las sesiones de laboratorio es recomendable vestir ropa sencilla, que proteja la mayor parte del cuerpo y preferentemente de algodón, zapatos cerrados, con suelas gruesas y sin tacones o plataformas.
2. No introducir ni consumir alimentos o bebidas en el laboratorio. No fumar.
3. Operar un instrumento o aparato solamente cuando sabes hacerlo, de otra manera solicitar la ayuda del profesor, del ayudante o del técnico del laboratorio, para adquirir la destreza necesaria.

4. Una vez concluido el uso de un aparato o instrumento, seguir el procedimiento adecuado para apagarlo, desconectarlo, guardarlo y entregarlo al responsable de su custodia.
5. Al concluir una práctica, levantar todos los instrumentos, equipos y accesorios utilizados, verificar que todas las tomas de agua, gas, aire u otras en el lugar de trabajo estén bien cerradas y dejar limpias y secas las mesas de trabajo y el piso del laboratorio.

INSTRUCTIVO PARA LA ELABORACIÓN DE PRE-REPORTES

"Nunca es posible introducir solamente cantidades observables en una teoría. Es la teoría quien decide qué se debe observar."
Alberto Einstein, 1926.

Objetivo

El pre-reporte tiene el objetivo de mostrar que el/la alumno/a ha realizado el trabajo necesario para efectuar una práctica de laboratorio de manera conciente e informada, para que la experiencia le resulte estimulante y provechosa, logrando establecer un puente entre sus conocimientos teóricos del tema y la aplicación práctica de los mismos.

Sobre la forma de elaborar el pre-reporte

El pre-reporte deberá contener las secciones que se detallan abajo, todas escritas en buen español e impresas en tipo de letra y estilo uniforme, que indiquen un trabajo integrado de equipo entre los alumnos que lo presentan como producto de su trabajo. Las páginas estarán numeradas y seguirán la secuencia del siguiente

Contenido

1. Portada

Es la primera página del pre-reporte. Deberá contener la identificación completa: La Universidad, la Carrera, la Asignatura, la palabra "Pre-reporte", el nombre de la práctica, los nombres de los integrantes del equipo, el nombre del Profesor y la fecha de entrega del pre-reporte.

2. Índice

Se enumerarán las secciones y sub-secciones con las respectivas páginas de sus inicios.

3. Objetivos

Se enunciarán en forma breve, completa y numerada los objetivos de la realización de la práctica, desde la perspectiva de los integrantes del equipo.

4. El equipo

Se describirá el equipo principal donde se realizan los procesos termodinámicos. Esto incluirá **un dibujo** con las dimensiones aproximadas y una descripción de los procesos termodinámicos que se llevarán a cabo en el sistema.

5. Fundamentos teóricos y su aplicación

El propósito de esta sección es desarrollar las relaciones que permiten describir los procesos termodinámicos que se llevan a cabo en el sistema. A partir de estas relaciones se

estimarán las cantidades o parámetros de interés, solicitados en los resultados. Esta sección consta de las siguientes sub-secciones:

5.1 Principios termodinámicos

Se identificarán y enunciarán los principios termodinámicos dominantes que se llevarán a cabo en el equipo y se hará una representación idealizada del mismo, mediante **un diagrama**, incorporando la identificación de los parámetros geométricos y las variables importantes.

5.2 Hipótesis

Se establecerán las hipótesis pertinentes que corresponden al modelo físico simplificado. Las hipótesis estarán numeradas y cada una seguida por una justificación específica suficiente.

5.3 Modelo matemático

Se definirán los sistemas donde se establecerán los principios y conceptos termodinámicos. Se identificarán las variables y su significado en un diagrama de cada sistema. Se indicará que el desarrollo completo, que lleva de los principios a las ecuaciones de trabajo, se encuentra en el Apéndice X, donde se elaborarán los modelos a detalle, cuando sea pertinente. En el cuerpo del trabajo se incluirán los elementos principales del modelo matemático que son:

- ✓ Las ecuaciones que corresponden a las relaciones termodinámicas, numeradas.
- ✓ La solución correspondiente al conjunto de relaciones en juego.
- ✓ Las expresiones finales (ecuaciones de trabajo) para determinar las propiedades o variables de interés, objetivo de la práctica.
- ✓ Si se requiere de una calibración del equipo, el desarrollo que permite conocer el parámetro calibrado a partir de las expresiones para un sistema elegido con este fin.

6. Diseño de la práctica

El propósito de esta sección es determinar los elementos y procedimientos necesarios para el desarrollo de la práctica y consta de las siguientes sub-secciones:

6.1 Variables y parámetros

A partir de las expresiones finales para determinar las variables de interés, se identificarán las cantidades a ser medidas y los parámetros que es necesario conocer y se propondrá la manera de adquirir la información necesaria para cada uno de los elementos anteriores, indicando las fuentes (referencias) de las correlaciones o valores a usar, así como la precisión necesaria (por ejemplo, una longitud se requiere en cm, mm, 0.1 mm, μm , u otro nivel de precisión).

6.2 Elección del sistema

Cuando sea pertinente, se presentará un conjunto de sustancias de interés, candidatas a ser utilizadas como sistema de estudio, que por sus propiedades reúnan las características compatibles con las hipótesis que corresponden a la naturaleza de los compuestos químicos a ser usados. Esto puede necesitar algunas estimaciones termodinámicas, (por ejemplo de la idealidad de una determinada sustancia), cuidando además los aspectos de

seguridad, toxicología y economía. En un Apéndice Y se incluirá la información relativa a cada una de estas sustancias. En el texto principal se indicarán las razones para elegir una de las opciones y se definirá el sistema. Si se requiere una calibración, se elegirá también la sustancia para calibrar, indicando las razones de su elección.

6.3 Hoja de datos

En una hoja completa se elaborará un formato para recabar todos los datos necesarios para la realización de la práctica. Esta hoja contendrá en su encabezado

- ✓ El nombre de la práctica
- ✓ La identificación del equipo que la realiza y la fecha de realización

Además contendrá los siguientes campos, indicando en cada caso las unidades requeridas:

- ✓ Los parámetros estimados
- ✓ Los parámetros medidos
- ✓ Las variables medidas, con su tabulación con respecto a otras variables (por ejemplo con respecto a la temperatura, para procesos isotérmicos) de ser necesario, así como las repeticiones de las lecturas
- ✓ Si se requiere una calibración, elaborar los puntos anteriores necesarios para realizarla y repetir los pertinentes para el sistema desconocido (el problema)

Hacer una copia de esta hoja de datos, para ser entregada al profesor el día que se realice la práctica, con la información experimental y de los parámetros estimados, completa.

6.4 Equipo y materiales

Se hará una lista de los equipos e instrumentos necesarios para las mediciones y otra para los materiales, indicando las cantidades necesarias.

6.5 Desarrollo de la práctica

Se describirán en forma secuencial y numerada las actividades a desarrollar durante la realización de la práctica, anotando los aspectos que se consideren importantes para la correcta realización de las actividades (por ejemplo, cuidar que el nivel de un líquido no rebase determinada altura, que un instrumento esté seco o que un líquido se introduzca resbalando manteniendo el recipiente inclinado, etc...).

7. Referencias

Todas las referencias deberán estar mencionadas en algún lugar del texto. La manera de mencionarlas será por ejemplo:

"... este modelo se encuentra resuelto en Felder y Rousseau (1991)."

Correspondiendo a esta mención, en la sección de referencias se incluirá:

Felder, R.M. y Rousseau, R.W., 1991. *Principios Elementales de los Procesos Químicos* Addison Wesley Iberoamericana (Segunda edición).

Es decir que un libro referido incluye los siguientes datos en forma ordenada:

- ✓ Apellido e iniciales de los autores (o de los editores)
- ✓ Año de publicación de la edición consultada
- ✓ Título del libro (en letra itálica)
- ✓ Editorial
- ✓ Edición.

Si se trata de un libro colectivo, donde los capítulos son escritos por diversos autores y la referencia es de un capítulo en particular, se seguirá el siguiente orden:

- ✓ Apellido e iniciales de los autores del capítulo
- ✓ Año de publicación de la edición consultada
- ✓ Título del capítulo (en letra romana)
- ✓ La palabra "En"
- ✓ Título del libro o manual (en letra itálica)
- ✓ Apellido e iniciales de los editores del libro, seguidos de la abreviación "(eds.)"
- ✓ Editorial
- ✓ Edición.

8. Apéndices

Cada Apéndice tendrá un número consecutivo y un nombre que indique su contenido y **deberá estar mencionado en el texto**. Las ecuaciones llevarán numeración consecutiva, precedida por la letra A, por ejemplo, "(A.12)" es la ecuación # 12 en los Apéndices.

INSTRUCTIVO PARA LA ELABORACIÓN DE REPORTES

*"Al inicio, uno solamente se pregunta sobre la posibilidad de las cosas,
y luego uno les reprocha no ser imposiblemente perfectas"*
Jean Rostand, 1962.

Ojalá y pudiéramos, al concluir una práctica, compartir estas palabras de Rostand, sin embargo hay muchos aspectos que algunas veces nos impiden demostrar con nitidez la correspondencia entre la teoría y la práctica. Cuando notamos semejanzas notables entre el comportamiento observado y nuestras teorías, adquirimos mayor certeza para manipular los materiales y para utilizar nuestras predicciones como herramientas de trabajo, basadas en los conocimientos adquiridos en la carrera. También somos capaces de determinar cuáles son los factores que influyen - y en qué medida - en las diferencias y/o discrepancias entre nuestras teorías, nuestras operaciones de laboratorio y nuestras observaciones. Una práctica fallida puede ser una excelente práctica, si los alumnos son capaces de identificar y evaluar las fuentes de las discrepancias. Si es factible, una práctica fallida deberá ser repetida con las mejoras pertinentes.

Objetivo

El reporte final de una práctica tiene el objetivo de mostrar que los/las alumnos/as del equipo han desarrollado un conjunto coordinado de actividades a partir de sus conocimientos teóricos del tema de la práctica, que les ha permitido diseñar el experimento y realizar las mediciones adecuadas; que luego han llevado a cabo el tratamiento y el análisis de sus datos para obtener resultados cuya validez son capaces de delimitar. A partir de esta experiencia los alumnos/as son capaces de discutir y elaborar sus conclusiones y sugerencias para mejorar la realización de la práctica o podrán, alternativamente, elaborar una crítica fundamentada para demostrar la invalidez de las teorías o de los procedimientos seguidos en la realización de la práctica, de ser el caso.

Sobre la forma de elaborar el reporte

El reporte deberá contener las secciones que se detallan abajo, todas escritas en buen español e impresas en tipo de letra y estilo uniforme, que indiquen un trabajo integrado de equipo entre los alumnos que lo presentan como producto de su trabajo. **El reporte es un producto final del trabajo** realizado en la práctica, por lo que incluye la mayoría de las secciones consideradas en el pre-reportaje, que para la presentación de este reporte deben incorporar las mejoras sugeridas por el profesor, más las secciones relativas a la realización del experimento y el tratamiento posterior de la información obtenida. Las páginas del reporte estarán numeradas y seguirán la secuencia del siguiente

Contenido

1. Portada*

2. Resumen ejecutivo

Es la segunda página del reporte. En forma concisa se informará sobre el objetivo de la práctica, el equipo y las consideraciones principales del modelo, **se enfatizarán los resultados** obtenidos, así como las limitaciones a su validez.

3. Índice*

4. Objetivos*

5. Fundamentos teóricos*

5.1 El equipo*

5.2 Modelo físico simplificado*

5.3 Hipótesis*

5.4 Modelo matemático*

6. Diseño de la práctica*

6.1 Variables y parámetros*

6.2 Elección del sistema*

6.3 Hoja de datos*

6.4 Equipo y materiales*

6.5 Desarrollo de la práctica*

7. Realización de la práctica

7.1 Mediciones

Se incorporará la hoja de datos original, con la información completa de las mediciones originales y de los parámetros y/o valores de la literatura. Cuando la hoja de datos original haya sufrido modificaciones mayores, al estar realizando la práctica, se elaborará una hoja de datos modificada, con toda la información necesaria en ella, haciendo un comentario autocrítico sobre los cambios requeridos por la hoja original.

7.2 Observaciones

Se hará una lista de las observaciones de interés, a juicio de los integrantes del equipo, realizadas durante la realización del experimento, indicando en qué reside su interés para la materia de estudio.

8. Análisis de datos y resultados

En esta sección se hará el tratamiento de las mediciones de laboratorio para obtener como resultado los parámetros o funciones propuestas como objetivos específicos de la práctica.

8.1 Cálculos

La información de la hoja de datos se verá en una hoja de *Excel*, también se podrá usar *Matemática* o *MathLab*, y se realizarán las operaciones pertinentes, de acuerdo a las expresiones desarrolladas a partir del modelo, para encontrar los resultados.

8.2 Análisis estadístico y resultados

De acuerdo con las escalas de los instrumentos, se incluirán solamente las cifras significativas en los resultados. Se hará un análisis estadístico, considerando las repeticiones, para reportar los resultados finales con sus incertidumbres.

8.3 Gráficas

Si es el caso, se elaborarán gráficas por computadora, para representar el comportamiento de las variables medidas. Se graficarán los valores experimentales con sus incertidumbres y se incluirá la estimación teórica del modelo. También se incorporarán otras gráficas requeridas, a juicio de los alumnos o solicitadas específicamente en el instructivo de la práctica correspondiente. Las gráficas se podrán incorporar a la sub-sección de análisis y resultados, si lo consideran conveniente.

8.4 Discusión y conclusiones

Se compararán los resultados obtenidos con otros conocidos, ya sea de la literatura o de experimentos realizados previamente por alumnos de grupos anteriores en esta u.e.a. Con esta información los integrantes del equipo elaborarán sus conclusiones, con una actitud crítica y autocrítica.

8.5 Sugerencias y recomendaciones

Como resultado de su experiencia, los integrantes del equipo propondrán aquí lo que consideren que puede mejorar la realización del experimento.

9. Referencias*

10. Apéndices*

En los Apéndices se incluirán, además de los mencionados sobre el desarrollo del modelo y las propiedades de los materiales, aquellos que son necesarios para la documentación completa del trabajo realizado, pero cuya inclusión en el texto principal lo haría pesado o distraería la atención de la secuencia de ideas hacia discusiones complementarias.

PRÁCTICA A2

VOLUMEN ESPECÍFICO, TEMPERATURA Y COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA PARA LÍQUIDOS

OBJETIVOS

Que la/el alumna/o:

1. Comprenda el funcionamiento de los aparatos para determinar el volumen específico (o su inverso, la densidad), la temperatura y el coeficiente de expansión térmica de un líquido.
2. Seleccione sustancias adecuadas para sus experimentos.
3. Determine los valores del volumen específico y la temperatura, a partir de mediciones derivadas del comportamiento de los líquidos, a la presión barométrica de la ciudad de México.
4. Determine el coeficiente de expansión térmica a partir de sus resultados anteriores.
5. Conozca otros aparatos y sus principios físicos, para medir las propiedades termodinámicas anteriores.
6. Establezca una escala particular de temperatura y encuentre su relación con otras escalas.
7. Determine las incertidumbres de sus resultados y compare éstos con valores conocidos.

MOTIVACIÓN

En el invierno de los lugares fríos se requiere mantener líquida el agua potable de las tuberías. Su congelamiento podría romper la tubería. ¿Porqué?

EQUIPO PRINCIPAL

Se sugieren dos aparatos para cumplir los objetivos de esta práctica: Un matraz aforado (Figura 1) y una balanza para determinar el volumen específico de un líquido y un matraz con tapón y tubo (capilar) para fabricar un termómetro de líquido (Figura 2).

PREGUNTAS GUÍA

1. ¿Qué es un sistema termodinámico y qué sus alrededores?
2. ¿Qué es el equilibrio termodinámico?
3. ¿Qué son los procesos isotérmicos, isobáricos, isocóricos y adiabáticos?
4. ¿Qué es un proceso reversible y cuál es su importancia?

5. ¿Cómo pueden aproximarse a procesos reversibles las operaciones de laboratorio?
6. ¿Cómo se determina el volumen específico con un picnómetro?
7. ¿Cómo se transforman los grados centígrados a grados Fahrenheit? ¿Cómo se elabora esta fórmula?
8. ¿Qué es una temperatura absoluta o termodinámica?
9. ¿Qué es el coeficiente de expansión térmica?
10. ¿Cuál es el principio de la operación de los termómetros de expansión de fluido?
11. ¿Porqué hay termómetros capilares de inmersión parcial y de inmersión total y cómo se usan correctamente?

APARATOS

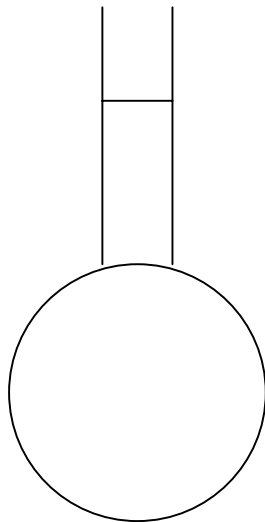


Figura 1
Matraz aforado.

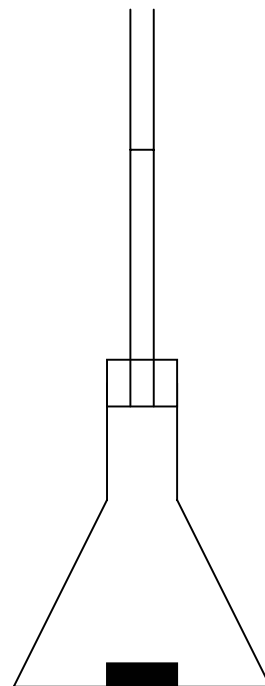


Figura 2
Termómetro de expansión de líquidos.

SUGERENCIAS PARA EL DESARROLLO TEÓRICO

La densidad, ρ , es una variable de estado que se puede determinar pesando la masa de un volumen conocido de líquido. La densidad cambia con la temperatura y la presión. El inverso de la densidad es el volumen específico, \tilde{V} . Se puede determinar experimentalmente la dependencia del volumen específico con la temperatura a presión constante, por medición directa a varias temperaturas del sistema. A partir de estos datos se puede encontrar el coeficiente de expansión térmica, β , que se define como

$$\beta = \frac{1}{\tilde{V}} \left(\frac{\partial \tilde{V}}{\partial T} \right)_P = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P$$

El coeficiente de expansión térmica se puede estimar a partir de los datos $\{T, \rho\}$ a presión constante de varias formas, cuya diferencia está en la manera de evaluar la derivada:

1. Se grafican los datos T vs. ρ y se ajustan a una línea recta. La pendiente de la recta es el valor de la derivada.
2. Si la gráfica no se ajusta a una recta, se prueba una cuadrática (o en general, una forma polinomial):

$$\rho = aT^2 + bT + c$$

de donde

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P = 2aT + b$$

y

$$\beta = -\frac{2aT + b}{aT^2 + bT + c}$$

3. Se estima la derivada localmente por diferencias finitas y se traza una gráfica de T vs. $\left(\frac{\Delta \rho}{\Delta T} \right)_P$. De la forma de la gráfica se decide si la derivada es una constante o si se ajusta a una línea recta o a un polinomio.

Por otra parte, la construcción del termómetro requiere seleccionar:

1. Dos eventos que se lleven a cabo a temperaturas distintas, pero fijas, como son dos cambios de estado. Por ejemplo, el punto de fusión del agua (o del alcohol etílico) y el punto de ebullición del alcohol etílico (o de la acetona).
2. Una escala de temperaturas que asigne un valor de temperatura a cada uno de los dos puntos fijos.
3. Un algoritmo para la conversión de los grados de la escala inventada a los grados Celsius, Fahrenheit u otros.

DESARROLLO PROPUESTO

Para observar el comportamiento VT:

1. Selecciona tres líquidos para determinar su comportamiento VT; asegúrate de que están disponibles para la realización de la práctica.
2. Determina la masa de cada líquido en el matraz aforado a diferentes temperaturas, verificando que el sistema esté en equilibrio termodinámico y que el volumen sea el del aforo.
3. Repite los experimentos para garantizar la validez estadística de tus resultados.

Para fabricar un termómetro de líquido:

1. Determina el volumen aproximado del bulbo.
2. Selecciona dos cambios de estado del mismo o de dos líquidos. Investiga cuáles son las temperaturas a de estos cambios de estado en la ciudad de México. Estas serán tus temperaturas de referencia.
3. Selecciona el líquido del termómetro considerando su coeficiente de expansión térmica y su punto de ebullición en la ciudad de México, el volumen del bulbo, la longitud y el diámetro del capilar.
4. Con los datos anteriores y la temperatura ambiente, calcula el nivel del líquido de trabajo e introdúcelo en el bulbo, cuidando que no queden burbujas atrapadas.
5. Encuentra los niveles del líquido para tus dos temperaturas de referencia.
6. Divide la longitud entre ambas marcas en 100 partes iguales (o en n partes iguales, a tu arbitrio), Cada una de estas partes es un grado que lleva un nombre arbitrario, así como los grados "Celsius" o "Fahrenheit". Aquí los llamaré, en general, "Grados Delta" ($^{\circ}D$).

RESULTADOS

1. A partir de las mediciones determina el volumen específico como función de la temperatura.
2. Elabora gráficas de temperatura (T) vs. volumen específico (V) para cada una de las sustancias.
3. Haz ajustes lineales o polinomiales y presenta las correlaciones $V = f(T)$
4. Encuentra el coeficiente de expansión térmica para cada sustancia a partir de las correlaciones anteriores y a partir de la aproximación de la derivada como un cociente incremental de las diferencias entre dos puntos, para los datos T vs. V (método de diferencias finitas). Aquí las diferencias se pueden tomar hacia delante, hacia atrás o como el promedio de ambas. ¿Hay diferencia en los resultados, para las diferencias consideradas? ¿Qué valores están mas cercanos a los datos de la literatura? ¿A qué puede deberse esto?
5. Desarrolla fórmulas para transformar los grados Delta a grados centígrados, Fahrenheit, Kelvin y Rankine.
6. Discute sobre la discordancia de las escalas de temperatura basadas en las propiedades de las sustancias, con relación a la escala termodinámica de temperatura.

REFERENCIAS

- Balzhiser, R.E., Samuels, M.R. y Eliassen, J.D., 1974. Termodinámica Química para Ingenieros, Prentice Hall,
- Holman, J.P., 1986. Métodos Experimentales para Ingenieros, Mc Graw Hill de México, Segunda edición en español.
- Lanczos, C., 1988. Applied Analysis, Dover.

PRÁCTICA A3

EL BARÓMETRO Y LOS MANÓMETROS

OBJETIVOS

Que la/el alumna/o:

1. Comprenda el funcionamiento de los manómetros de fluido y del barómetro de Torricelli, para determinar la presión.
2. Mida la presión barométrica de la ciudad de México.
3. Aplique la ley de los gases ideales para determinar el volumen de gas en el manómetro
4. Mida la presión manométrica y absoluta de un gas contenido en un recipiente.
5. Conozca otros aparatos y sus principios físicos, para medir la presión de los gases.
6. Determine las incertidumbres de sus resultados y compare éstos con valores conocidos.

MOTIVACIÓN

Las inversiones térmicas de los meses de invierno en la ciudad de México ocurren debido al enfriamiento del aire más cercano a la superficie del suelo. Esta capa de aire puede renovarse cuando se ha calentado lo suficiente. Explica porqué.

EQUIPO PRINCIPAL

El barómetro de Torricelli (Figura 1) es un tubo de longitud suficiente, que se coloca vertical e invertido en un recipiente abierto, de modo que el peso de un líquido en el interior del tubo equilibra la presión atmosférica de la superficie del recipiente, dejando en la parte superior una región del tubo a la presión de vapor del líquido (y a la temperatura del mismo). El líquido se elegirá con la particularidad de **no emplear mercurio**, debido a su toxicidad.

PREGUNTAS GUÍA

1. ¿Qué es un sistema termodinámico y qué sus alrededores?
2. ¿Qué es el equilibrio termodinámico?
3. ¿Qué es un proceso reversible y porqué es importante?
4. ¿Cómo puede aproximarse a un proceso reversible en las operaciones de laboratorio?
5. ¿Qué diferencia hay entre una presión absoluta y una manométrica?
6. ¿Cuál es la presión barométrica media de la ciudad de México, según el Observatorio de Tacubaya?
7. ¿Qué semejanzas y diferencias termodinámicas encuentras entre un globo aerostático a una burbuja?
8. ¿Qué es el coeficiente de expansión térmica de un gas?

9. ¿Qué es un gas ideal?
 10. ¿Qué es la histéresis?

APARATOS

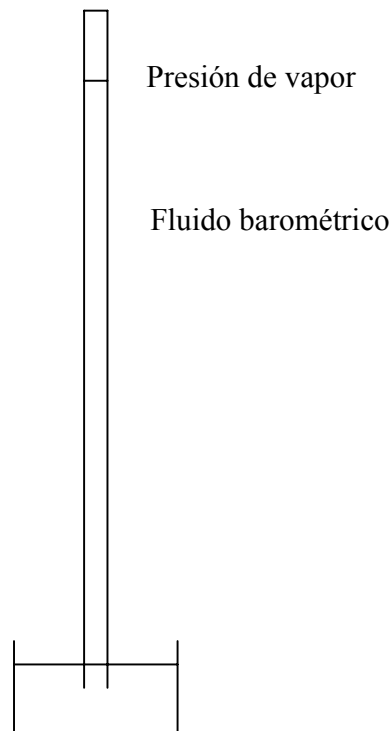


Figura 1
Barómetro de Torricelli.

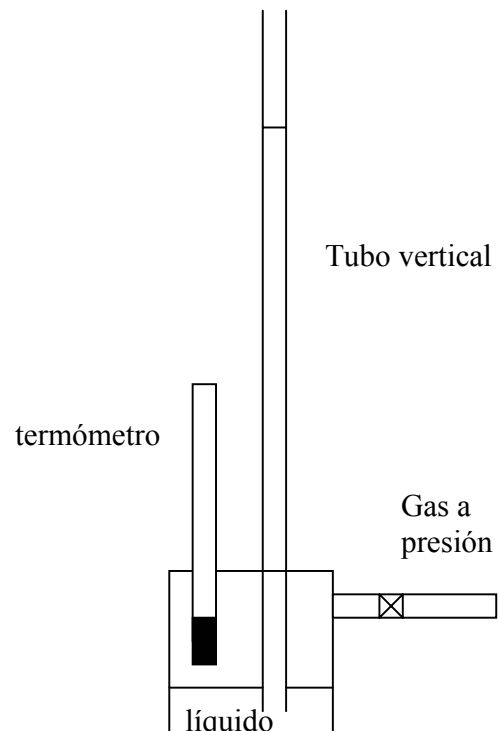


Figura 2
Manómetro de fluido.

DESARROLLO PROPUESTO

Medir la presión barométrica por el método de Torricelli. Si la altura requerida es grande, efectuar las mediciones en lugares apropiados, como los huecos de las escaleras del edificio T.

Con el manómetro de líquido:

El manómetro se puede operar con una cantidad constante de líquido o con una cantidad constante de gas. Para operar con una cantidad constante de líquido:

1. Colocar agua u otro líquido hasta una tercera parte del recipiente.
2. Introducir el termómetro, que debe quedar en la cámara de gas. El extremo inferior del manómetro debe quedar por completo sumergido en el líquido. Ajustarlos.
3. Se puede trabajar con aire o con otro gas. En el último caso habrá que purgar el sistema con una corriente del gas para expulsar completamente el aire, antes de iniciar las mediciones.
4. La primera medición se hará a presión atmosférica. El volumen de gas en esta medición será \hat{V}_0 y es desconocido.

5. Inyectar una pequeña cantidad de gas, abriendo ligeramente la válvula.
6. Medir la presión, la temperatura y el cambio de volumen de gas (suponiendo que el líquido tiene densidad constante).
7. Repetir los pasos 5 y 6 tantas veces como sea posible, sin derramar el líquido por el tubo del manómetro.

Para operar con una cantidad constante de gas:

1. Efectuar los pasos 1 a 4 indicados arriba.
2. Agregar líquido con una pipeta, por el extremo abierto del tubo del manómetro, midiendo el volumen agregado.
3. Leer la altura de la columna de líquido en el manómetro. ¿El volumen de esta columna es igual al volumen agregado? Explicar.

Realiza la siguiente secuencia de experimentos:

1. Desarrolla un primer experimento, el “Experimento 1”, para determinar V_0 sin medirlo directamente, a partir de la ley del gas ideal y de varias mediciones con una cantidad constante de gas, agregando pequeñas cantidades de líquido.
2. Deja escapar un poco de gas, hasta volver a la presión atmosférica. Determina el volumen de gas, V_0' , cuando cierras nuevamente el recipiente, a presión atmosférica.
3. Desarrolla ahora otro experimento, el “Experimento 2” con una cantidad constante de líquido, agregando varias veces pequeñas cantidades de gas.

RESULTADOS

1. Reporta la presión barométrica medida. ¿De qué parámetros depende?
2. Encuentra el volumen inicial de gas (a presión atmosférica), V_0 , a partir de tus mediciones del experimento 1 y verifícalo por la medición directa.
3. Encuentra el volumen inicial de gas para el experimento 2 (V_0')
4. Determina el número de moles de gas en la cámara del manómetro, para cada estado termodinámico medido en el Experimento 2.

REFERENCIAS

- Balzhiser, R.E., Samuels, M.R. y Eliassen, J.D., 1974. Termodinámica Química para Ingenieros, Prentice Hall,
- Holman, J.P., 1986. Métodos Experimentales para Ingenieros, Mc Graw Hill de México, Segunda edición en español.
- Lanczos, C., 1988. Applied Analysis, Dover.

PRÁCTICA B

COMPORTAMIENTO PVT DE LOS GASES IDEALES

OBJETIVOS

Que la/el alumna/o:

1. Verifique la ley de los gases ideales para un gas a baja presión.
2. Determine los valores de la presión y el volumen específico a las temperaturas de las observaciones.
3. Determine las incertidumbres de sus resultados y compare éstos con valores conocidos.

MOTIVACIÓN

En un reactor químico a volumen constante, el producto es un gas. Se pretende estudiar la cinética de la reacción observando los cambios en la presión del reactor. El análisis se simplifica operándolo isotérmicamente.

EQUIPO PRINCIPAL

Una celda de volumen constante (excepto por la expansión térmica del material de la celda. (Ver Figura 1).

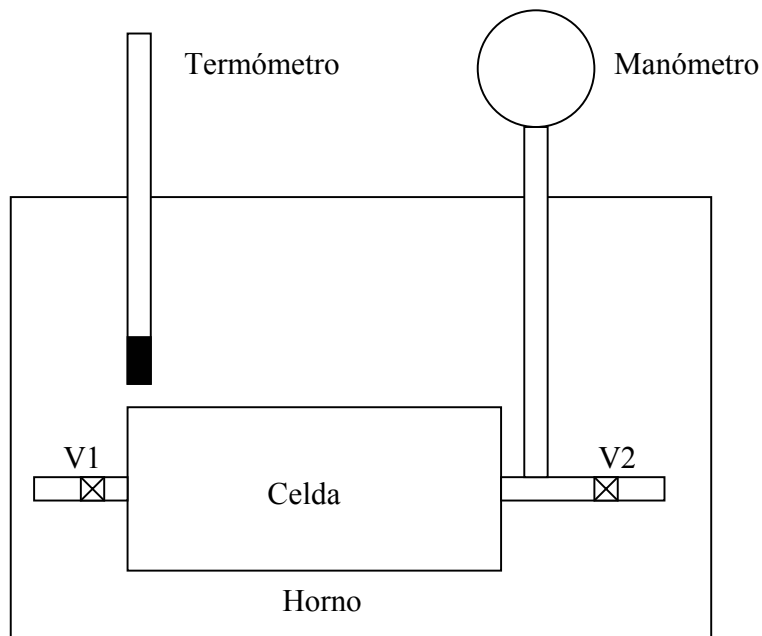


Figura 1. Celda de volumen constante

PREGUNTAS GUÍA

1. ¿Qué establecen las leyes de Boyle, de Gay-Lussac y de los gases ideales?
2. ¿Qué es la constante universal de los gases ideales?
3. ¿Cómo se encuentra una constante para un gas en particular?
4. ¿Qué es una propiedad intensiva y qué una extensiva?
5. ¿Cómo se considera la influencia de la masa del gas en la ley de los gases ideales?

SUGERENCIAS PARA EL DESARROLLO TEÓRICO

El gas en la celda a volumen constante es un sistema cerrado. Un sistema cerrado se encuentra en un estado de equilibrio después de algún tiempo, cuando no interactúa con sus alrededores. Entonces su presión y su temperatura (y sus potenciales químicos, si tiene más de una especie química) son homogéneos y uniformes, es decir que cualquier punto del sistema tiene los mismos valores de presión y temperatura que todos los demás. Este es el estado inicial de la celda a un cierto tiempo después de inyectar el gas. Al aumentar la temperatura del horno provocamos una interacción del sistema con sus alrededores, rompiendo el estado de equilibrio. Conforme la temperatura del horno se estabiliza en un nuevo valor, el gas de la celda tiende a un nuevo estado de equilibrio, que se habrá alcanzado cuando su temperatura sea igual a la temperatura del horno y la presión del manómetro ya no experimente cambios posteriores. Entonces el valor de la presión del manómetro (expresada como presión absoluta) es la presión del gas a la temperatura del horno (que es también la temperatura del gas).

Si la presión es baja el gas se comportará como un gas ideal y su volumen específico permanecerá constante (¿porqué?). Al aumentar sucesivamente la temperatura del horno, esperando a que se establezca un nuevo estado de equilibrio, se obtendrá un conjunto de estados de equilibrio $\{T, P\}$ cuya gráfica es una línea recta (si se cumple la ley del gas ideal) y de cuya pendiente es posible extraer el volumen específico del gas en la celda (¿cómo?). Con este resultado se puede encontrar el número de moles-gramo de gas introducidos si se conoce el volumen de la celda, o viceversa.

DESARROLLO PROPUESTO

1. Colocar la celda en el horno, con el manómetro afuera del mismo, de manera que la presión sea visible.
2. Verificar que el sistema no tenga fugas.
3. Purgar bien la celda a vacío, con la válvula V1 abierta y la válvula V2 cerrada. Si el gas a usar es aire, no es necesario purgar. Pasar al punto 5.
4. Cerrar la válvula V1. El sistema queda a vacío.
5. Purgar el sistema con un flujo de gas entrando por la válvula V1 y saliendo por la otra (V2).
6. Cerrar la válvula V2 manteniendo la conexión al gas
7. Fijar la presión inicial deseada, observando la carátula del manómetro. Cerrar la válvula V1.
8. Acomodar la celda en el horno y cerrarlo. Iniciar el calentamiento a unos 100 °C.

9. Tomar datos de la temperatura del horno y de la presión del manómetro conforme transcurre el tiempo, tomando como tiempo cero el momento del cambio de la temperatura deseada del horno. A $t = 0$ la temperatura del horno es T_0 y la presión de la celda es P_0 .
10. Hacer gráficas de $T - T_0$ y de $P - P_0$ vs. el tiempo.
11. Cuando la temperatura y la presión ya no cambian, tomar el par de valores (T, P) . Como esto puede tomar varias horas o bien puede ser que se observen oscilaciones sostenidas, debido al tipo de control de la temperatura del horno, verificar que las oscilaciones de temperatura son estacionarias (alrededor de un valor medio constante) y que los valores de la presión parecen tender a un valor asintótico.
12. Incrementar la temperatura paulatinamente, repitiendo los pasos 9 a 11 a cada incremento de temperatura, hasta llegar a la temperatura máxima deseada, recordando que la celda no debe rebasar 5 atm. de presión.
13. Apagar el horno, abrir la puerta y enfriar la celda. Manipularla con guantes aislantes si es necesario.

RESULTADOS

1. Para encontrar los valores asintóticos de la presión (P_{eq}), ajusta los datos de $(P - P_0)$ vs. el tiempo (t) a la ecuación:

$$(P - P_0) = (P_{eq} - P_0) (1 - e^{-\alpha t}),$$

donde $(P_{eq} - P_0)$ y α son dos parámetros a determinar por el ajuste. El valor encontrado de P_{eq} es una aproximación al valor de la presión en el estado de equilibrio termodinámico, para la temperatura media del horno. ¿Cómo justificas esta afirmación?

2. Encuentra la presión absoluta (a volumen constante).
3. Elabora gráficas de temperatura (T) vs. presión absoluta (P).
4. Haz el ajustes lineal $P = f_l(T)$
5. Encuentra el volumen específico a partir de la ley del gas ideal y de tus resultados.
6. Encuentra la función $(\partial P / \partial T)_V$ a partir de las correlaciones anteriores y a partir de la aproximación de la derivada como un cociente incremental de las diferencias entre dos puntos, para los datos T vs. P . Aquí las diferencias se pueden tomar hacia delante, hacia atrás o como el promedio de ambas. ¿Hay diferencia en los resultados, para los métodos seguidos? ¿Qué valores están mas cercanos a los datos de la literatura? ¿A qué se debe esto?

REFERENCIAS

- Balzhiser, R.E., Samuels, M.R. y Eliassen, J.D., 1974. Termodinámica Química para Ingenieros, Prentice Hall,
- Holman, J.P., 1986. Métodos Experimentales para Ingenieros, Mc Graw Hill de México, Segunda edición en español.
- Lanczos, C., 1988. Applied Analysis, Dover.

PRÁCTICA C

PROPIEDADES PVT DE LOS VAPORES A BAJA PRESIÓN

OBJETIVOS

Que la/el alumna/o:

1. Reconozca cuando un sistema cerrado alcanza estados de equilibrio termodinámico.
2. Reconozca un vapor saturado y lo distinga de uno sobrecalentado.
3. Utilice las Tablas de Vapor del agua para determinar los procesos termodinámicos y los valores de las propiedades que se propone observar.
4. Determine los valores de la presión y el volumen específico a las temperaturas de las observaciones.
5. Determine las incertidumbres de sus resultados y compare éstos con valores conocidos.

MOTIVACIÓN

Los vapores saturados de un solvente (acetona) se usan para precalentar la alimentación a un intercambiador de calor. ¿Cuánto calor puede aportar un flujo dado de acetona, a una presión conocida?

EQUIPO PRINCIPAL

Una celda de volumen constante (excepto por la expansión térmica del material de la celda, que se considera despreciable, Figura 1), adaptada con válvulas de entrada y salida y un manómetro digital.

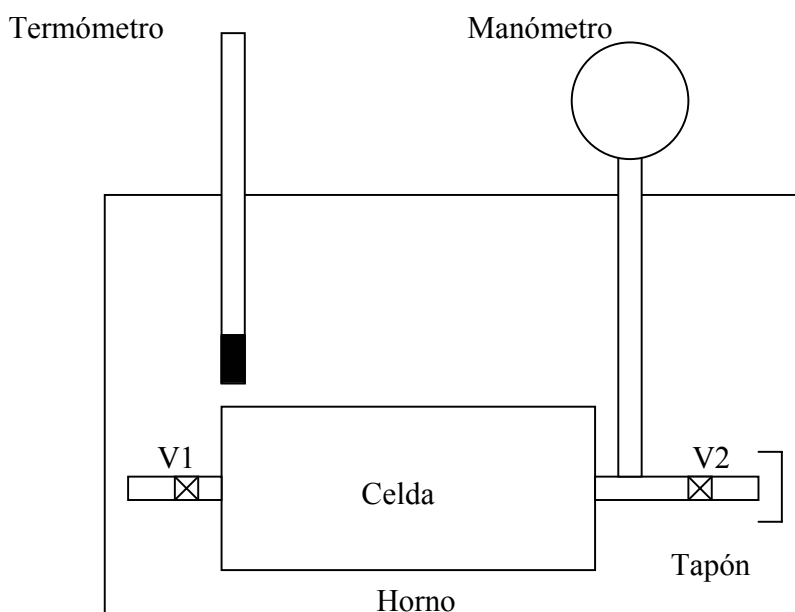


Figura 1. Celda para medir el comportamiento PT a V constante, para vapores.

PREGUNTAS GUÍA

1. ¿Qué es el equilibrio termodinámico?
2. ¿Cómo se reconoce el equilibrio termodinámico en la celda que usarás?
3. ¿Qué establece la regla de las fases?
4. ¿Qué es el calor latente de evaporación?
5. ¿Qué es un gas real?
6. ¿Qué es un vapor?

SUGERENCIAS PARA EL DESARROLLO TEÓRICO

El fluido atrapado en la celda a volumen constante es un sistema cerrado. Un sistema cerrado se encuentra en un estado de equilibrio después de algún tiempo, cuando no interactúa con sus alrededores. Entonces su presión y su temperatura (y su potencial químico, si tiene más de una especie química) son homogéneos y uniformes, es decir que cualquier punto del sistema (agua y vapor en la celda) tiene los mismos valores de presión y temperatura que todos los demás. Este es el estado inicial de la celda un cierto tiempo después de inyectar el agua. Al aumentar la temperatura del horno provocamos una interacción del sistema con sus alrededores, rompiendo el estado de equilibrio. Conforme la temperatura del horno se estabiliza en un nuevo valor, el agua de la celda tiende a un nuevo estado de equilibrio, que se habrá alcanzado cuando su temperatura sea igual a la temperatura del horno y la presión del manómetro ya no experimente cambios ulteriores. Entonces el valor de la presión del manómetro (expresada como presión absoluta) es la presión de saturación del agua a la temperatura del horno (que es también la del agua y del vapor). De la cantidad de agua inyectada depende que el sistema sea saturado o sobresaturado. Para que el sistema permanezca saturado, debe existir en todo momento algo de líquido. Cuando éste se evapora por completo, cualquier aumento ulterior de temperatura conduce a la sobresaturación.

De acuerdo con la regla de las fases de Gibbs, el sistema saturado tiene un grado de libertad (debido a que tiene un sólo componente y dos fases, sin reacciones químicas), en tanto que el sistema sobresaturado tiene dos grados de libertad (un componente y una fase, sin reacciones químicas). Esto significa que en el sistema saturado basta conocer una variable de estado para tener el mismo completamente determinado, en tanto que se requiere conocer dos variables de estado para determinar el estado termodinámico del vapor sobresaturado.

Las Tablas de Vapor reflejan lo dicho arriba, mientras la Tabla de Vapor Saturado nos da las propiedades de estado a partir solamente de la temperatura (o de la presión), en la primera columna, la Tabla de Vapor Sobresaturado requiere ubicar la presión en la primera columna y la temperatura en la primera fila, para encontrar los valores de las otras variables de estado en la intersección de la columna y la fila deseadas.

Utilizaremos las Tablas de Vapor para estimar la cantidad de agua líquida que debemos inyectar para que el sistema permanezca saturado en todo el rango de temperaturas del horno y siempre por debajo de una presión máxima, que nos permita operar la celda sin peligro de ruptura. También estimaremos la cantidad de agua a inyectar para que se evapore por

completo a una temperatura dada (podemos fijar, por ejemplo, 100 °C), de modo que a temperaturas superiores el sistema sea sobresaturado. En estas estimaciones el volumen específico juega un papel muy importante, ¿porqué?

La curva (T,P) de sobresaturación que podremos graficar con nuestros datos de laboratorio es una curva isocórica, es decir que el volumen específico del vapor sobrecalentado es constante. En contraste, el volumen específico del vapor saturado **no** permanece constante. ¿Porqué existe esta diferencia? A partir de estas observaciones y de las Tablas de Vapor estima, para un conjunto de 5 valores de la temperatura cubriendo el rango de operación del horno (80 a 250 °C), cuáles son los valores correspondientes de la presión, para el sistema saturado y para el sobresaturado que has seleccionado (seleccionaste el sistema sobresaturado al elegir la cantidad de agua a inyectar, ¿porqué?). ¿Tus mediciones de la presión de equilibrio concuerdan con las estimaciones anteriores?

DESARROLLO PROPUESTO

1. Colocar la celda en el horno, con el manómetro afuera del mismo, de manera que la presión sea visible.
2. Verificar que el sistema no tenga fugas.
3. Purgar bien la celda a vacío, con la válvula V1 abierta y la válvula V2 cerrada.
4. Cerrar la válvula V1. El sistema queda a vacío.
5. Colocar la cantidad deseada del líquido a evaporar en una jeringa (¿Cuál es esa cantidad para observar la curva de saturación?).
6. Cerrar herméticamente con el tapón, perforado por una aguja, el acceso al tubo de la válvula V2.
7. Ajustar la jeringa a la aguja del tapón y abrir la válvula V2.
8. Inyectar con fuerza el líquido, para que penetre en la celda.
9. Cerrar la válvula V2 y retirar el tapón.
10. Acomodar la celda en el horno y cerrarlo. Iniciar el calentamiento a unos 80 °C.
11. Tomar datos de la temperatura del horno y de la presión del manómetro conforme transcurre el tiempo, tomando como tiempo cero el momento del cambio de la temperatura deseada del horno. A $t = 0$ la temperatura del horno es T_0 y la presión de la celda es P_0 .
12. Hacer gráficas de $T - T_0$ y de $P - P_0$ vs. el tiempo.
13. Cuando la temperatura y la presión ya no cambian, tomar el par de valores (T , P). (Comparar con los valores estimados de las Tablas de Vapor). Como esto puede tomar varias horas o bien puede ser que se observen oscilaciones sostenidas, debido al tipo de control de la temperatura del horno, verificar que las oscilaciones de temperatura son estacionarias (alrededor de un valor medio constante) y que los valores de la presión parecen tender a un valor asintótico.
14. Incrementar la temperatura paulatinamente, repitiendo los pasos 11 a 13 a cada incremento de temperatura, hasta llegar a la temperatura máxima deseada.
15. Apagar el horno, abrir la puerta y enfriar la celda. Manipularla con guantes aislantes.
16. Repetir los pasos 3 a 15 para observar el comportamiento del vapor sobrecalentado. ¿Cuál es la cantidad de agua que se debe introducir en la celda para observar el comportamiento del vapor sobrecalentado?

RESULTADOS

7. Para encontrar los valores asintóticos de la presión (P_{eq}), ajusta los datos de ($P - P_0$) vs. el tiempo (t) a la ecuación:

$$(P - P_0) = (P_{eq} - P_0) (1 - e^{-\alpha t}),$$

donde ($P_{eq} - P_0$) y α son dos parámetros a determinar por el ajuste. El valor encontrado de P_{eq} es una aproximación al valor de la presión en el estado de equilibrio termodinámico, para la temperatura media del horno. ¿Cómo justificas esta afirmación?

8. Presenta tus mediciones en Excel y haz los cálculos apropiados para encontrar el volumen específico (a temperatura constante) y la presión absoluta (a volumen constante).
9. Elabora gráficas de temperatura (T) vs. presión absoluta (P) y de temperatura (T) vs. volumen específico (V)
10. Haz los ajustes lineales $P = f_1(T)$ y $V = f_2(T)$.
11. ¿El producto $f_1 f_2$ daría la ley del gas ideal? Explica porqué no y cómo se verificaría dicha ley.
12. Encuentra la función $(\partial P / \partial T)_V$ a partir de las correlaciones anteriores y a partir de la aproximación de la derivada como un cociente incremental de las diferencias entre dos puntos, para los datos T vs. P . Aquí las diferencias se pueden tomar hacia delante, hacia atrás o como el promedio de ambas. ¿Hay diferencia en los resultados, para los métodos anteriores? ¿Qué valores están mas cercanos a los datos de la literatura? ¿A qué puede deberse esto?

REFERENCIAS

- Balzhiser, R.E., Samuels, M.R. y Eliassen, J.D., 1974. Termodinámica Química para Ingenieros, Prentice Hall,
- Holman, J.P., 1986. Métodos Experimentales para Ingenieros, Mc Graw Hill de México, Segunda edición en español.
- Lanczos, C., 1988. Applied Analysis, Dover.

PRACTICA D

BALANCES TÉRMICOS

OBJETIVOS

Que la/el alumna/o:

1. Establezca el balance térmico para un intercambiador de calor de tubos concéntricos, a partir de la primera ley de la termodinámica.
2. Compruebe el balance térmico para diversas condiciones de entrada y para configuraciones de flujo en paralelo y a contracorriente, con el fluido caliente por el tubo interior y por la región anular.
3. Calcule los cambios de entropía en las corrientes caliente y fría y en el intercambiador completo.
4. Estime las pérdidas de calor hacia los alrededores.

MOTIVACIÓN

Se desea aprovechar la entalpía de una corriente de productos que salen de un reactor a temperatura elevada para pre-calentar la corriente de reactivos al reactor. Fijando las temperaturas de entrada y salida de los productos, se pide al ingeniero que calcule la temperatura de salida de la corriente de reactivos. ¿Qué datos adicionales necesita el ingeniero para hacer la estimación solicitada? ¿Cuál es la temperatura mínima posible para la corriente de salida de los productos?

EQUIPO PRINCIPAL

Se utilizará el intercambiador de calor de doble tubo “Armfield”. Su diagrama y operación se describen en el instructivo HT31 que se puede solicitar al técnico del laboratorio.

PREGUNTAS GUÍA

1. El intercambiador de calor a usar ¿es un sistema abierto o cerrado?
2. En la operación a régimen estacionario, ¿cuáles son los estados termodinámicos de importancia para establecer el balance térmico?
3. ¿Qué funciones de estado y de trayectoria son importantes en el intercambiador de calor?
4. ¿Cómo se determina el calor intercambiado entre las corrientes caliente y fría?
5. ¿Cómo se regula el gasto o flujo volumétrico? ¿Cómo se mide?
6. ¿Cómo podría medirse la presión de los estados termodinámicos de interés?
7. ¿Es razonable despreciar los efectos de pérdidas de energía por efectos de fricción?

8. ¿El flujo de calor es mayor en la operación a contracorriente o en paralelo? ¿Porqué?
9. ¿Las pérdidas de calor son mayores para la corriente caliente fluyendo por el tubo interno o por la región anular? ¿Porqué?
10. ¿A qué temperatura estimarás los valores de las propiedades necesarias para tus estimaciones?

SUGERENCIAS PARA EL DESARROLLO TEÓRICO

En un intercambiador de calor predominan los efectos térmicos sobre los efectos mecánicos, de tal manera que el balance de energía se puede reducir a un balance térmico. Para elaborar balances de energía, así como para la aplicación de los principios de balance y de conservación, **es necesario definir unívocamente los sistemas** donde estos principios serán aplicados. Muchos intercambiadores de calor son sistemas abiertos, porque operan con flujos continuos del fluido frío y del fluido caliente, muchas veces a régimen estacionario. El intercambio de calor se da a través de las paredes que separan ambos fluidos y también puede existir cierto intercambio de calor con los alrededores, cuando el intercambiador no está bien aislado.

Para desarrollar los balances térmicos en un intercambiador de calor debemos principiar por determinar los sistemas. Cada uno de los fluidos es un sistema. Si adoptamos la convención de que el flujo de calor Q es positivo cuando ingresa al sistema, entonces es positivo para el fluido frío, pero negativo para el fluido caliente, puesto que el calor fluye hacia fuera del sistema. También habría que incluir, en principio, el intercambio de calor con los alrededores, puesto que la pared del intercambiador no está aislada (aunque el vidrio no es un buen conductor térmico). ¿Este intercambio con los alrededores podría explicar la posible discrepancia en los valores del calor intercambiado entre ambos fluidos o habrá que proponer otra explicación?

DESARROLLO PROPUESTO

La localización de las líneas de entrada y salida, de los sensores y sus conexiones y del control de flujo, así como su operación y captura de datos, se encuentran en los instructivos HT30 y HT31. Es necesario que te familiarices con ellos. Aquí sólo se presenta una posible secuencia de los experimentos a desarrollar.

1. Conectar el intercambiador para operación en paralelo, con el fluido caliente fluyendo por el tubo interior.
2. Fijar los flujos volumétricos y la temperatura de entrada del fluido caliente.
3. Comprobar que se opera a régimen estacionario.
4. Capturar las temperaturas en los puntos especificados y flujos de ambas corrientes.
5. Cambiar el valor deseado (set point) para el flujo del fluido caliente.
6. Repetir los pasos 3 y 4.
7. Cambiar la temperatura de entrada del fluido caliente.
8. Repetir los pasos 3 y 4.

9. Volver a fijar el valor deseado del flujo del fluido caliente en su valor inicial (conservando la última temperatura de entrada del fluido caliente).
10. Repetir los pasos 3 y 4.
11. Conectar el intercambiador en paralelo, con el fluido caliente fluyendo por la región anular entre los dos tubos.
12. Repetir los pasos 2 a 10.
13. Conectar el intercambiador a contracorriente, con el fluido caliente fluyendo por el tubo interior.
14. Repetir los pasos 2 a 10.
15. Conectar el intercambiador a contracorriente, con el fluido caliente fluyendo por la región anular entre los dos tubos.
16. Repetir los pasos 2 a 10.

RESULTADOS

Haz una Tabla para las diferentes configuraciones (paralelo o a contracorriente y fluido caliente por el tubo interno o por la región anular) y para las diferentes condiciones de operación (flujos bajos o altos y temperatura del fluido caliente menor o mayor), evaluando en cada caso el flujo de calor hacia el fluido frío y el flujo de calor desde el fluido caliente, así como la diferencia entre ambos valores. Explica el sentido físico de esta diferencia, si la hay y es significativa. Concluye sobre la mejor configuración para operar el intercambiador si los criterios son el de obtener el máximo intercambio de calor con el mínimo de pérdidas.

REFERENCIAS

- Armfield, 1999. Instructivo HT30X, “Heat Exchanger Service Unit”
- Armfield, 1999. Instructivo HT31, “Tubular Heat Exchanger”
- Armfield, 2000. Instructivo IFD3, “General Purpose Interface Device”
- Balzhiser, R.E., Samuels, M.R. y Eliassen, J.D., 1974. Termodinámica Química para Ingenieros, Prentice Hall,
- Holman, J.P., 1986. Métodos Experimentales para Ingenieros, Mc Graw Hill de México, Segunda edición en español.

PRÁCTICA E

BALANCES DE ENERGÍA MECÁNICA

OBJETIVOS

Que la/el alumna/o:

1. Establezca el balance mecánico para una tubería con una bomba centrífuga, a partir de la primera ley de la termodinámica.
2. Compruebe el balance mecánico para diversos flujos volumétricos, estimando las pérdidas de energía mecánica
3. Calcule el incremento de entropía en la corriente.

MOTIVACIÓN

Para llenar un tanque elevado con agua se requiere realizar el trabajo de desplazar el agua desde una cisterna, dándole energía potencial. Si el proceso se realizara a una velocidad muy baja, la cantidad de trabajo realizado sobre el agua sería equivalente al incremento de su energía potencial, sin embargo, como el trabajo se lleva a cabo a una velocidad dada, existen pérdidas de energía mecánica por efecto de la fricción en el sistema, de modo que el trabajo realizado por la bomba es mayor que dicho incremento de energía.

EQUIPO PRINCIPAL

Se utilizará la unidad de demostración de una bomba centrífuga “Armfield”. Su diagrama y operación se describen en el instructivo FM20 que se puede solicitar al técnico del laboratorio.

El módulo cuenta con un recipiente y un circuito de flujo con una bomba centrífuga, equipado con un termopar y dos sensores de presión diferencial, uno colocado entre la entrada y la salida de la bomba y el otro para determinar la caída de presión en una brida de orificio, Éste último sirve para determinar el flujo volumétrico del agua. Hay también un selector de corriente eléctrica que regula la velocidad angular del impulsor de la bomba, que se mide con un sensor óptico.

PREGUNTAS GUÍA

1. ¿Qué formas de la energía se consideran en la Primera Ley de la Termodinámica, para un sistema abierto?
2. ¿Cómo se relaciona el cambio en la energía interna del fluido con la fricción y cómo se determina?
3. ¿Cómo se determina la potencia efectiva de la bomba sobre el fluido?

SUGERENCIAS PARA EL DESARROLLO TEÓRICO

Para elaborar balances de energía, así como para la aplicación de los principios de balance y de conservación, **es necesario definir unívocamente el sistema** donde estos principios serán aplicados. Un sistema abierto tiene un flujo másico que entra y sale del sistema por algunas porciones de la superficie que lo limitan. Estas regiones de flujo son fronteras con entrada y salida de materia. Otras regiones, como la pared de un ducto o de un recipiente, son impermeables al flujo de materia, pero puede existir transporte de calor a través suyo. En un sistema cerrado, por el contrario, no existe flujo másico a través de la frontera, aunque puede haber un intercambio de calor y trabajo con los alrededores.

En esta práctica aplicaremos balances de energía y de entropía a sistemas abiertos y cerrados, con cuatro propósitos:

1. Evaluar el trabajo efectivo que la bomba transfiere al agua.
2. Determinar cómo se emplea el trabajo aplicado al agua.
3. Evaluar la pérdida de energía mecánica, que se convierte en calor por la fricción del fluido, así como la transferencia de calor hacia los alrededores.
4. Evaluar la producción de entropía en el proceso.

Para lograr los objetivos anteriores será necesario:

1. Elaborar un balance de energía entre la entrada y la salida de la bomba.
2. Elaborar un balance de energía y uno de entropía, para todo el circuito, como sistema abierto.
3. Elaborar un balance de energía y uno de entropía, para todo el circuito, como sistema cerrado.

Un aspecto interesante que sobresale aquí es que el circuito se puede considerar como un sistema abierto o como un sistema cerrado, dependiendo de cómo sea definido. Como sistema abierto, el circuito se puede tomar entre una sección de entrada (punto 1), que puede situarse en la superficie del líquido en el tanque y una sección de salida (punto 2) que puede ser la descarga del ducto de retorno al tanque. Toda el agua del circuito se puede considerar también como un sistema cerrado. Al aplicar la primera ley de la Termodinámica a este sistema se puede encontrar el flujo de calor a los alrededores. ¿Cómo se puede encontrar la generación de entropía?

DESARROLLO PROPUESTO

1. Se carga el recipiente con agua destilada hasta que el nivel se encuentra a la mitad entre el extremo abierto del recipiente y la salida del tubo de retorno.
2. Se ingresa al software del módulo y se selecciona la opción del diagrama
3. Se fija el regulador de la velocidad de la bomba con un porcentaje de energía deseado.
4. Con la válvula de control y la válvula de paso completamente abiertas, se acciona la bomba centrífuga, Se espera a que desaparezcan las burbujas en el recipiente y a que la operación sea estacionaria.
5. Se toma el valor de la temperatura en un instante dado ($t=0$).

6. Se toma nuevamente el tiempo y la temperatura, una vez que se ha incrementado en el orden de 0.5 a 1.5 °C
7. En el transcurso de este intervalo de tiempo se toman también varias lecturas del flujo volumétrico y la presión diferencial entre la entrada y la salida de la bomba, así como la potencia eléctrica suministrada al motor de la bomba y la potencia neta entregada al fluido.
8. Se cambia el flujo volumétrico estrangulando la válvula de control
9. Se repiten los pasos 5 a 8 para el nuevo flujo y se repiten estas operaciones cubriendo el rango de flujo del circuito.
10. Se cambia la velocidad del impulsor y se repiten los pasos 5 a 9.

RESULTADOS

1. Encontrar la potencia efectiva suministrada por la bomba al fluido, a partir de la Primera Ley de la Termodinámica y la eficiencia de la bomba, definida como

$$\text{Eficiencia} = (\text{potencia suministrada al fluido})/(\text{potencia eléctrica suministrada a la bomba})$$

Para cada condición de flujo.

2. Estimar la disipación de energía mecánica (aumento de energía interna por unidad de tiempo) para cada condición de flujo, aplicando la Primera Ley de la Termodinámica. (Suponer que el circuito es adiabático)

REFERENCIAS

- Armfield, 2000. Instructivo IFD3, “General Purpose Interface Device”
- Armfield, 1996. Instructivo FM20, “Capture Centrifugal Pump Demonstration Unit”
- Balzhiser, R.E., Samuels, M.R. y Eliassen, J.D., 1974. Termodinámica Química para Ingenieros, Prentice Hall,