

LIBROS DE INTERNET
Serie hispanoamericana de ingeniería

**EXPERIMENTOS DE CASA
EN MECÁNICA DE FLUIDOS
Y TRANSFERENCIA DE
CALOR**

Rafael Chávez Martínez
*Laboratorio de Termofluidos, Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Cd. de México 04510, MEXICO*

Mihir Sen
*Department of Aerospace and Mechanical Engineering
University of Notre Dame, Notre Dame, IN 46556, EE.UU.*
29 de julio de 2020



Serie hispanoamericana de ingeniería

Editores

MIHIR SEN, *University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana, EE.UU.* (Mihir.Sen.1@nd.edu)

JORGE RAMOS GREZ, *Pontificia Universidad Católica, Santiago, CHILE* (jramos@ing.puc.cl)

FRANCISCO JAVIER SOLORIO ORDAZ, *Universidad Nacional Autónoma de México, MÉXICO* (fjso@unam.mx)

Editor asociado

RAFAEL CHÁVEZ MARTÍNEZ, *Universidad Nacional Autónoma de México, MÉXICO* (rafacham@gmail.com)

Serie hispanoamericana de ingeniería

Libros de internet

Los *libros de Internet* viven en el internet en la forma de pdf. Lo que tiene que hacer los lectores es simplemente bajarlo a su computadora¹, tableta o aún al teléfono celular². Se puede leer en el aparato mismo o impreso en papel.

Serie de ingeniería

Está escrita específicamente para estudiantes de licenciatura³ en las diversas ramas de ingeniería en escuelas hispanoamericanas. Entre sus características son: longitud corta ya que por lo general son alrededor de 150 páginas cada uno, dividido en 30 a 35 capítulos para que se puede usar cada uno como una clase, y disponible en el internet a todos sin costo alguno.

Sabiendo que los temarios pueden variar con tiempo los *libros de internet* tiene la flexibilidad de que pueden cambiarse y subirse fácilmente. Además el libro puede completarse poco a poco y puede usarse así. El lector debe entonces fijarse en la fecha que aparece en la portada ya que es una indicación de la versión. También el temario puede ser diferente entre escuela y escuela. Por eso se pueden tener diferentes libros con títulos muy parecidos. El lector puede descargar la versión que más le convenga. Con tiempo se van agregando los títulos.

¹Conocido también como computador or ordenador.

²O móvil.

³O pregrado.

Este libro

Características

Es un manual de experimentos sobre la mecánica fluidos y transferencia de calor, experimentos que se pueden hacer en casa con lo que se tiene comúnmente ahí.

Autores

El Dr. Rafael Chávez Martínez es egresado de la *Universidad Nacional Autónoma de México* donde es actualmente profesor y jefe del *Departamento de Termodinámicos*. Ha impartido los cursos teóricos y del laboratorio en la mecánica de fluidos y transferencia de calor.

El Dr. Mihir Sen estudió su ingeniería en India (IIT-Madras) y el posgrado en EE.UU. (MIT) Fue profesor en la *University of Notre Dame* y dió clases en el área de matemáticas e ingeniería térmica. Se retiró de ahí en 2017 y ahora es profesor emérito. Sus intereses en investigación cubren las áreas de convección natural, flujo en medios porosos, control térmico, redes neuronales, algoritmos genéticos, y derivadas fraccionales, entre otras.

Prólogo

El material presentado en este manuscrito son instrucciones para los experimentos que se deben llevar a cabo durante la segunda mitad de los dos cursos de licenciatura llamados *Laboratorio de Mecánica de Fluidos* y *Laboratorio de Transferencia de Calor* para el semestre enero–mayo del año 2020 en la *Facultad de Ingeniería* de la *UNAM*. Este semestre se cancelaron las clases y laboratorios presenciales a mitad de camino comenzando en marzo debido a la contingencia creada por la pandemia del COVID-19. Se escribieron estas instrucciones con la intención de continuar las actividades de enseñanza en el *Laboratorio de Termodinámica*.

Debido a las circunstancias y como alternativa a los laboratorios formales se sugieren aquí experimentos que se puedan armar con materiales de uso común en casa, o que éstos se puedan comprar en una ferretería sin que su adquisición represente un gasto considerable para los alumnos. Cada una de las prácticas se desarrolló con la intención de que los alumnos comprendan los fenómenos físicos involucrados en el transporte de fluidos y de los procesos de transferencia de calor. Cabe destacar que ésta es simplemente una guía y no una receta a seguir, por lo que los resultados obtenidos dependerán de las dimensiones y tipos de materiales utilizados, así como de las habilidades de quien construya el arreglo experimental. Por tanto, se invita a los alumnos a que utilicen su creatividad y conocimientos para obtener mejores resultados.

Hay una relación interesante entre la teoría y la experimentación. Se necesita la primera para diseñar un experimento. Por otro lado los datos observados en un experimento tienen sentido únicamente en el contexto de una teoría.

Se espera que con esta guía los alumnos puedan realizar experimentos básicos en su casa. Cada práctica está dividida en secciones, con la siguiente estructura: Objetivo, Materiales, Bases físicas, Procedimiento, Comentarios. Las prácticas a realizar dependen de la asignatura que se curse y a criterio del instructor. Al final de cada práctica se incluye un cuestionario, se recomienda que los alumnos la contesten. Dependiendo del desarrollo de la práctica se pueden solicitar bocetos, tablas o gráficas resultado de las observaciones y mediciones realizadas.

A veces se usará el espacio en los márgenes para notas como ésta.

Rafael Chávez Martínez
Laboratorio de Termodinámica, Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Cd. de México 04510, MEXICO

Mihir Sen
Department of Aerospace and Mechanical Engineering
University of Notre Dame, Notre Dame, IN 46556, E.U.

© Rafael Chávez Martínez, Mihir Sen, 2020

Estrategias básicas experimentales

A lo largo de su estancia en la Universidad, los estudiantes de ingeniería aprenden y se familiarizan con el manejo de diversos tipos de instrumentos de medición y herramientas matemáticas que le serán útiles en su vida profesional. La mayor parte de los instrumentos de medición son altamente especializados y costosos. Por otro lado, otros son de uso tan cotidiano que se les puede adquirir en tiendas de electrónica. En cuanto a herramientas matemáticas se refiere, se han ideado herramientas como el teorema II-Buckingham, análisis de ordenes de magnitud, etc., que nos ayudan a identificar los parámetros más importantes de un fenómeno.

Instrumentos de medición

Para realizar los experimentos contenidos en este manual se tomó en cuenta que los instrumentos a utilizar sean de uso cotidiano, como son: regla para medir longitudes y recipientes para medir volúmenes de fluido.

En algunos casos es necesario el uso de instrumentos de medición más especializados como son: multímetro digital, sensores de temperatura (termómetro, termopar o termistor), medidor de presión, entre otros. Afortunadamente, hoy en día se cuenta con teléfonos inteligentes, que con la instalación de aplicaciones específicas puede sustituir muchos de estos instrumentos, algunas de estas son gratuitas. Existen aplicaciones que permiten medir la intensidad de luz, presión atmosférica local, temperatura, medir tiempo, y tomar videos y fotografías de alta calidad.

Herramientas matemáticas

Una de las herramientas de uso común en ingeniería mecánica es el análisis dimensional, de la que solo abarcaremos la homogeneidad dimensional. Esta herramienta nos ayuda a verificar la homogeneidad de las ecuaciones en cuanto a las unidades que maneja, y nos ayuda a detectar errores de cálculo.

El análisis inicia identificando las dimensiones de cada uno de los términos que componen una ecuación. Al sustituir las dimensiones y simplificar se debe obtener el mismo resultado. Se debe poner atención en que además de que todos los términos tienen la misma magnitud física, deben tener la misma unidad. Por ejemplo: todas las unidades deben ser metros (m), kilogramos (kg), etc. Es común que los profesores den el siguiente ejemplo: “siempre hay que sumar peras con peras y manzanas con manzanas”. A pesar de que ambos son fruta.

Herramientas matemáticas

Una de las herramientas de uso común en ingeniería mecánica es el análisis dimensional, de la que solo abarcaremos la homogeneidad dimensional. Esta herramienta nos ayuda a verificar la homogeneidad de las ecuaciones en cuanto a las unidades que maneja, y nos ayuda a detectar errores de cálculo.

El análisis inicia identificando las dimensiones de cada término de la ecuación. Al sustituir las dimensiones y simplificar, todos los términos de la ecuación deben tener las mismas dimensiones. Se debe poner atención en usar las mismas unidades. Por ejemplo: todas las unidades deben ser metros (m), kilogramos (kg), etc. Es común que los profesores den el siguiente ejemplo: “siempre hay que sumar peras con peras y manzanas con manzanas”. A pesar de que ambas son fruta.

Otras fuentes de información

Una de las herramientas más importantes para la búsqueda de información es Internet.

- Información del experimento. En youtube.com se pueden encontrar videos en los que se realizan experimentos en transferencia de calor y dinámica de fluidos, estos pueden proporcionar información adicional así como ideas para la creación de nuevos experimentos.
- Teoría del experimento. Temas o ecuaciones vistos en semestres anteriores pueden fácilmente encontrarse. En algunos casos, para realizar los experimentos se necesitan conocimientos que no se han visto en clase. El no tener los conocimientos teóricos de un tema no significa que no se pueda realizar un experimento sobre de éste.

Índice general

Serie hispanoamericana de ingeniería	II
Este libro	III
Prólogo	IV
Estrategias básicas experimentales	V
I TÉCNICAS DE MEDICIÓN	1
1. Errores de mediciones	2
2. Mediciones usando instrumentación electrónica	4
3. Mediciones usando termopares y termistores	5
4. Mediciones usando el teléfono celular	6
5. Mediciones usando visualización	7
II MECÁNICA DE FLUIDOS	11
6. Instrumentación	12
7. Visualización de flujo	13
8. Hidroestática: tensión superficial	14
9. Hidroestática: presión	15
10. Hidroestática: vacío	16
11. Hidrodinámica: sifón	17
12. Hidrodinámica: relación constitutiva	18
13. Cinemática: vorticidad	19

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	VIII
14.Flujos viscosos: ecuación de Bernoulli	20
15.Flujos viscosos: pérdidas	21
16.Flujos viscosos: experimento de Enzo Levi	22
17.Flujos viscosos: transición	24
18.Flujos viscosos: túnel de viento	25
19.Fuerza de arrastre	26
20.Flujos viscosos: oscilaciones	29
III TRANSFERENCIA DE CALOR	30
21.Conducción: estado permanente y conductividad térmica	31
22.Conducción: temperatura transitoria	33
23.Conducción: material compuesto	36
24.Convección natural: placa plana	37
25.Convección natural: visualización	40
26.Convección natural: Rayleigh-Bénard	42
27.Convección: forzada y libre	44
28.Convección forzada: constante de tiempo	46
29.Convección forzada: ebullición	48
30.Transferencia de masa: proceso de mezcla	49
31.Radiación: emisividad de superficies	50
32.Radiación: ley de distancia	52
33.Radiación: luz infrarroja	53
34.Radiación: ley de Beer	54
35.Modos combinados: conducción con convección	55

Parte I

TÉCNICAS DE MEDICIÓN

Capítulo 1

Errores de mediciones

Objetivo

Medir el área de un rectángulo y estima los errores.

Materiales

1. una regla

Procedimiento

Dibujar un recángulo sobre el papel. Medir las dos longitudes y multiplicarlas para calcular el área.

$$A = L_1 L_2$$

Determinar el error en la medición de la longitud y por lo consiguiente el error en el área.

Bases físicas y matemáticas

Análisis de Kline y McClintock.

Comentarios

El error se define como la diferencia entre el valor medido y el correcto. Toda experimentación tiene errores de mediciones. Hay diferentes tipos de errores pero los principales son

- Gross errors: Gross errors are caused by mistake in using instruments or meters, calculating measurement and recording data results. The best example of these errors is a person or operator reading pressure gage 1.01 N/m^2 as 1.10 N/m^2 . It may be due to the persons bad habit of not properly remembering data at the time of taking down reading, writing and calculating, and then presenting the wrong data at a later time. This may be the reason for gross errors in the reported data, and such errors may end up in calculation of the final results, thus deviating results.

- Blunders: Blunders are final source of errors and these errors are caused by faulty recording or due to a wrong value while recording a measurement, or misreading a scale or forgetting a digit while reading a scale. These blunders should stick out like sore thumbs if one person checks the work of another person. It should not be comprised in the analysis of data.
- Measurement errors
 - errores sistemáticos
 - de los instrumentos
 - del ambiente: The environmental errors occur due to some external conditions of the instrument. External conditions mainly include pressure, temperature, humidity or due to magnetic fields. In order to reduce the environmental errors: (a) try to maintain the humidity and temperature constant in the laboratory by making some arrangements, (b) ensure that there shall not be any external electrostatic or magnetic field around the instrument.
 - de observaciones: these types of errors occurs are due to wrong observations or reading in the instruments particularly in case of energy meter reading. The wrong observations may be due to PARALLAX. In order to reduce the PARALLAX error highly accurate meters are needed: meters provided with mirror scales.
 - errores teóricos: Theoretical errors are caused by simplification of the model system. For example, a theory states that the temperature of the system surrounding will not change the readings taken when it actually does, then this factor will begin a source of error in measurement.
 - errores aleatorios

Preguntas

1. Determina el error en la medición de un volumen de un paralelepípedo.
2. Vertir el agua de un vaso a otro y seca bien el primero. Repítelo varias veces para determinar el porcentaje de agua que se queda en un vaso después de vertirlo.
3. Determinar el área seccional de un vaso con su volumen.
4. Medir la tasa de disminución del volumen del agua en una sartén al ponerlo a hervir en la estufa.

Capítulo 2

Mediciones usando instrumentación electrónica

Objetivo

Hidrómetro y manómetro

Materiales

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

Preguntas

1. Medir la presión dentro de un globo de aire inflado.
2. En un recipiente de agua medir la presión abajo de la superficie libre como función de la profundidad.
3. Girar una cubeta de agua alrededor de su propio eje. Observa de forma de la superficie libre.
4. ¿Cómo funciona el medidor de voltaje?

Capítulo 3

Mediciones usando termopares y termistores

Objetivo

Conocer el principio de funcionamiento de un termopar y crear uno propio.

Materiales

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

Preguntas

1. ¿Cómo funciona el termopar?
2. ¿Cómo funciona el termistor?
3. ¿Cómo funciona el RTD

Capítulo 4

Mediciones usando el teléfono celular

Objetivo

Usar algunos de los sensores que tiene un teléfono celular, p. ej. giroscopio. Con el teléfono celular se puede medir

- la longitud de columna del líquido en un manómetro como función del ángulo para la misma diferencia de presión.
- la intensidad de luz recibida como función de distancia de alejamiento entre la fuente y el receptor.

Materiales

-

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

Preguntas

1. Medir la temperatura en cada habitación en una casa.
2. Medir la presión atmosférica cada día la misma hora.
3. Usar diferentes instrumentos para medir la temperatura del cuerpo humano y comparar los valores obtenidos.

Capítulo 5

Mediciones usando visualización

Objetivo

Que los alumnos conozcan las técnicas básicas de visualización en fluidos, tanto en gases como en líquidos, y que utilicen estas técnicas para visualizar estructuras básicas en fluidos en movimiento.

Materiales

- un vaso de plástico pequeño
- recipiente transparente
- polen
- agua
- incienso
- fuente de luz
- cartulina
- esferas de diferentes diámetros, preferentemente de vidrio
- jeringa
- caja de cartón

Describir el comportamiento de un fluido que no podemos ver a simple vista, ese es el verdadero reto de la mecánica de fluidos y la convección.

Bases físicas

Una de las dificultades que al estudiar la mecánica y dinámica de fluidos, así como la transferencia de calor, es que se trabaja con fluidos translucidos y que por ende no se puede observar a simple vista su desplazamiento o deformación, por ejemplo el agua y el aire. Lo anterior ha forzado a ingenieros e investigadores a crear técnicas de visualización para fluidos.

En general estas técnicas se basan en agregar partículas que se desplazan con el fluido, y que de forma indirecta nos ayudan a visualizar los patrones de flujo. Lo anterior se facilita

resaltando las partículas con una fuente de luz. Para facilitar el análisis, es práctica común grabar o tomar fotografías de los experimentos.

Otra técnica consiste en inyectar tinta al fluido. La inyección de la tinta se realiza por medio de tubos muy pequeños o agujas, y en sistemas más complejos se utiliza una botella de Mariotte para dosificar de forma controlado la cantidad y velocidad de la tinta.

Existe una infinidad de partículas que por sus características pueden ser utilizadas como trazadores, por ejemplo: polen, limadura de polímeros y de metales como la plata, bronce. Para gases se utilizan partículas de humo, que se genera al quemar algún material flamable, por ejemplo incienso y tabaco. En el caso de tintas se utiliza colorante de alimentos, leche, etc.

Independientemente del método a utilizar, los requerimientos que las partículas y tintas deben cumplir son: (a) ser inertes, (b) que tengan una densidad similar al fluido de trabajo y (c) que no contaminen el medio ambiente.

Procedimiento

Esta práctica se divide en dos actividades. La primera se centra en la visualización en líquidos y la segunda en la visualización en gases, para las que se decidió utilizar polen e incienso, respectivamente, por su bajo costo y ser fáciles de adquirir.

Visualización en líquidos

Para obtener las partículas de polen, verter un poco de agua de agua y una cucharada sopera de polen en el vaso. Agitar con la cuchara y filtrar la mezcla con un colador de cocina de malla fina.

Verter agua en el recipiente hasta llenar el 90 % de su capacidad, agregar una cantidad pequeña de la mezcla filtrada y agitar con la cuchara hasta diluir perfectamente. La cantidad a agregar de la mezcla depende del tamaño del recipiente, por lo que para obtener mejores resultados se recomienda agregar cantidades pequeñas y observar la cantidad de partículas en el agua a contra-luz.

Cortar un cuadrado de 10 cm por lado de cartulina, al que se corta una ranura de 2 mm de ancho y 50 mm de largo en su centro. Preparar un arreglo lámpara - cartulina - recipiente de vidrio como se muestra en la Fig. 5.1. Como fuente de luz puede utilizarse una lámpara. El plano de iluminación debe quedar en posición vertical.

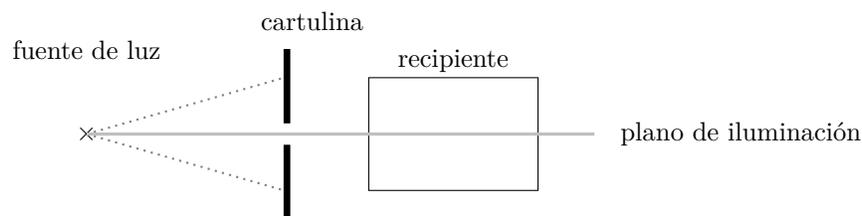


Figura 5.1: Esquema del experimento.

Actividad 1. Visualización del flujo al rededor de un objeto en movimiento. Dejar caer una esfera en el recipiente, cuidando que el trayecto del balón coincida con el plano de iluminación. Repetir el experimento con esferas de diferente tamaño, observando el movimiento del fluidos al rededor de estos.

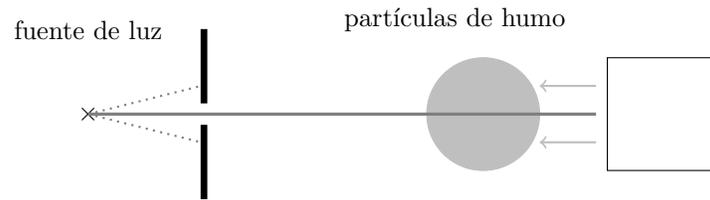


Figura 5.2: Esquema del experimento.

Actividad 2. Llenar la jeringa con la mezcla del recipiente, inyectar lentamente el fluido en el recipiente para evitar la formación de burbujas de aire. Repetir la actividad las veces necesarias para observar el comportamiento del flujo.

En ambos casos se recomienda grabar los eventos con un teléfono celular. Con los videos, realizar esquemas que describan el comportamiento del flujo al rededor de las esferas y el desplazamiento del agua al ser inyectada.

Visualización en gases

Para la visualización en gases se utilizará humo de incienso como trazador, para incrementar la cantidad de humo se recomienda quemar varias varitas de incienso al mismo tiempo.

Cortar en una de las caras de la caja de cartón un hueco circular de al menos 5 cm de diámetro, entre mayor sea el tamaño de la caja más humo se necesitará. Para mejorar la visualización del flujo se recomienda realizar las actividades en un cuarto con poca iluminación y utilizar el arreglo lámpara - cartulina, usando la configuración mostrada en la Fig. 5.2.

Prender las varitas de incienso en una base resistente al fuego e introducirla dentro de la caja. Esperar unos minutos hasta que se genere suficiente humo. Para generar el flujo de aire, golpear la pared posterior de la caja. Para facilitar la visualización, solicitar ayuda a un amigo o familiar.

Realice los eventos necesarios y grabar con la cámara del teléfono celular el desplazamiento del humo. Dibujar esquemas del flujo generado.

Comentarios

1. ¿Considera importante la densidad de las partículas trazadoras en la visualización de fluidos.
2. ¿Qué otro tipo de partículas utilizaría en las actividades anteriores?
3. ¿Cómo calcularía la velocidad de desplazamiento de la glicerina en la actividad 2?
4. En la actividad 2, Explique a que se debe la evolución del patrón de flujo una vez que el humo sale de la caja.
5. En la actividad 2, ¿qué sucederá con el flujo si el hueco de la caja es cuadrado?

Preguntas

1. Comparar las líneas de flujo usando diferentes trazadores.
2. Estime la diferencia en velocidad entre el fluido y el trazador dependiendo del tamaño del trazador.

Parte II

MECÁNICA DE FLUIDOS

Capítulo 6

Instrumentación

Objetivo

Hidrómetro y manómetro

Materiales

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

Preguntas

- 1.
- 2.
- 3.

Capítulo 7

Visualización de flujo

Objetivo

Usar trazadores para visualizar el flujo. Visualización en flujo de gases y líquidos con trazadores.

Materiales

1. colorante de alimentos
2. leche colorada
- 3.

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

Preguntas

- 1.
- 2.
- 3.

Capítulo 8

Hidroestática: tensión superficial

Objetivo

Observar el efecto de la capilaridad y la tensión superficial

Materiales

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

Preguntas

1. Verter un poco de leche en un plato poco profundo. Agregar cuidadosamente una gota de colorante vegetal en el centro del plato, si es de varios colores mejor. Aplicar un poco de detergente líquido a uno de los extremos de un mondadientes. Colocar el mondadientes en el centro del plato. Explicar que pasa.
2. En un recipiente con agua, colocar un barco de papel. Agregar una gota de jabón líquido en la parte posterior de barco. ¿Qué sucede?

Capítulo 9

Hidroestática: presión

No sé a que se refiere.

Objetivo

Materiales

Procedimiento

Discusión de resultados

Preguntas

1. Hidroestática: Un vaso lleno de agua, colocar una hoja de papel y voltear el vaso. ¿Qué sucede? ¿Por qué no cae el agua? ¿Cuál sería el tamaño de la columna de agua para que colapse? (es un clásico)
- 2.
- 3.

Capítulo 10

Hidroestática: vacío

Capítulo 11

Hidrodinámica: sifón

Objetivo

Se tienen dos vasos, uno contiene agua y el otro está vacío. Pasar el líquido de un vaso a otro utilizando un sifón.

Materiales

Procedimiento

Medir el flujo volumétrico como función de la diferencia de altura.

Bases físicas

Comentarios

Preguntas

1. Pasar el líquido de un vaso a otro utilizando un hilo. ¿Si es así, que fenómeno interviene?
2. Se tienen cinco vasos alineados. De forma alternada se llena un vaso con agua y el siguiente se deja vacío. Transportar el agua de los vasos, de tal forma que todos queden al mismo nivel, sin mover los vasos, utilizando solo servilletas o toallas absorbentes. ¿Cuál es el fenómeno que interviene en el transporte del agua?

Capítulo 12

Hidrodinámica: relación constitutiva

Objetivo

Observar la diferencia entre fluidos newtoniano y no newtoniano

Materiales

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

Preguntas

1. Mezcla de fécula de maíz con agua, dos partes de agua por una de fécula. Manipularla lentamente y de forma violenta. ¿Cómo se comporta en cada caso?
2. Colocar la mezcla de agua con fécula de maíz sobre una bocina, protegerla con una bolsa de plástico. Qué pasará con la mezcla al reproducir música clásica, country, jazz, cumbia o reguetón. ¿A qué se debe la diferencia en el comportamiento?
3. Deposite un poco de pasta de dientes en un plato. Introduzca un mondadientes en la pasta de forma que éste quede vertical, gire lentamente el mondadientes en dirección de las manecillas del reloj. ¿Qué sucede? Pasaría lo mismo si la dirección de giro fuese opuesta? ¿Sucede lo mismo con otros productos que encuentra en la cocina?

Capítulo 13

Cinemática: vorticidad

Objetivo

Materiales

- Cerrillos pegados o papel aluminio cortado en la forma de una cruz
- Desprendimiento de vortices de una placa plana

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

Preguntas

1. Anillo de vórtice. En una tina de al menos 50 cm de diámetro llenar con agua hasta el borde. Con un objeto circular de al menos 5 cm de diámetro, sumergirlo aproximadamente a la mitad y desplazarlo en la superficie por unos centímetros. ¿Qué sucede en la superficie? El fenómeno se puede observar mejor en un ambiente con buena iluminación, o agregando un poco de colorante vegetal en la superficie. De hecho es un semi-toroide.

Capítulo 14

Flujo viscoso: ecuación de Bernoulli

Objetivo

Aplicaciones de la ec. de Bernoulli

Materiales

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

Preguntas

1. Con un popote¹ en forma L sostener una pelota de unicel y otro material ligero.
2. Pegarse una hoja de papel en la frente, inclinarse de tal forma que el papel quede en posición vertical. Exhalar ligeramente. ¿Qué pasa con el papel? También funciona con dos globos colgados de una estructura y separados 5 cm una de la otra, soplar en el espacio entre los dos globos. ¿Puede explicar el funcionamiento de una chimenea (fireplace) con los experimentos anteriores?

¹También conocido como pajilla, sorbete y otros nombres.

Capítulo 15

Flujo viscoso: pérdidas

Objetivo

Pérdidas mayores: caída de presión en tuberías. Pérdidas menores: caída de presión en válvulas y codos.

Materiales

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

Preguntas

- 1.
- 2.
- 3.

Capítulo 16

Flujo viscoso: experimento de Enzo Levi

Objetivo

Medir la velocidad en un canal.

Materiales

- Una regla

Procedimiento

Ver la figura 16.1. Escribe la ecuación de Bernoulli entre puntos 1 y 2

$$\frac{V_1}{2} + gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = \frac{V_2}{2} + gz_2 + \frac{p_2}{\rho}$$

Ya que $p_1 = p_2$, $z_2 - z_1 = h$, $V_2 = 0$, se tiene

$$V_1 = \sqrt{2gh}$$

Bases físicas

Comentarios

Preguntas

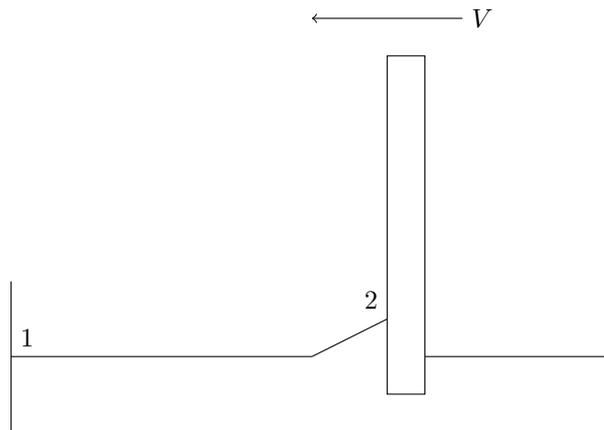


Figura 16.1: Esquema

Capítulo 17

Flujo viscoso: transición

Objetivo

Estudiar la transición de flujo laminar a flujo turbulento

Materiales

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

Preguntas

- 1.
- 2.
- 3.

Capítulo 18

Flujo viscoso: túnel de viento

Objetivo

Materiales

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

Preguntas

- 1.
- 2.
- 3.

Capítulo 19

Fuerza de arrastre

Objetivo

Que los alumnos observen el comportamiento del coeficiente de arrastre, C_d , de un paracaídas.

Materiales

- Hilo
- Plastilina¹
- Bolsa de plástico
- Cronómetro
- Taparroscas

Teoría

Todo cuerpo que se desplaza en un fluido experimenta una fuerza que se opone al desplazamiento del cuerpo, ésta se aplica en la misma dirección de desplazamiento, pero en dirección opuesta. Esta fuerza de arrastre, F_D , depende de la velocidad y geometría del cuerpo, así como de las propiedades del fluido, específicamente la viscosidad dinámica. La ecuación para calcularla es

$$F_d = C_d \frac{1}{2} \rho_f A v^2$$

donde C_D es el coeficiente de arrastre, ρ_f es la densidad del fluido (kg/m^3), A es el área proyectada del cuerpo en dirección del flujo (m^2) y v su velocidad (m/s). De éstos parámetros, el más complicado de determinar es el coeficiente de arrastre. Para las geometrías más comunes (placa plana, esfera, cilindros, etc.) el C_d ha sido estudiado ampliamente y existen

¹A veces conocido como Plasticina, masilla, etc.

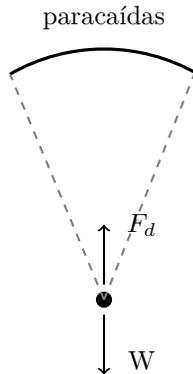


Figura 19.1: Suma de fuerzas en un objeto en caída libre.

correlaciones que describen su comportamiento en función del número de Reynolds. Para geometrías complejas éste parámetro se puede obtener de forma numérica o experimental.

Una forma de determinar el C_d para cuerpos en caída libre es mediante un balance de las fuerzas que actúan sobre dicho cuerpo, como se muestra en la Fig. 19.1. Cuando la velocidad de caída del paracaídas es constante se igualan la fuerza de arrastre y el peso del cuerpo, obteniendo la siguiente ecuación

$$C_d = \frac{W}{\frac{1}{2}\rho_a V^2 A}$$

donde W es el peso del arreglo masa-paracaídas (kg), g es la gravedad (m/s^2), ρ_a es la densidad del aire (kg/m^3), A es el área proyectada del paracaídas (m^2), V es la velocidad de caída del arreglo (m/s).

Procedimiento

Para construir el paracaídas se recomienda utilizar plástico delgado e hilo suficientemente fuerte para soportar el peso que se agregará para realizar los experimentos. Cortar un círculo de 20 cm de diámetro de la bolsa de plástico, entre mayor sea el tamaño del paracaídas más peso podrá soportar. Cortar cuatro trozos de hilo y amarrarlos al plástico circular, distribuyéndolos equitativamente. Amarrar los extremos opuestos de los hilos al taparroca para formar el paracaídas, todos los hilos deben tener la misma longitud.

Con la plastilina, formar seis esferas de cinco gramos cada una, éstas pueden sustituirse por objetos de peso similar. Fijar una de las esferas en la taparroca. Soltar el paracaídas de una altura de 2 m y medir el tiempo que tarda en caer al piso, se obtendrán mejores resultados al incrementar la altura a la que se suelta el paracaídas. Agregar otra de las esferas y repetir el mismo procedimiento. Repetir las lecturas hasta que se agreguen todas las esferas de plastilina. Anotar los resultados de cada experimento en una tabla y calcular el C_d . Presentar los resultados en una gráfica Re_p vs. C_d .

El número de Reynolds del paracaídas se calcula utilizando como longitud característica

Tabla 19.1: Resultados del experimento.

masa (kg)	tiempo (s)	velocidad (m/s)	Re_p	C_d

el diámetro del paracaídas (D). Por lo que queda definido como

$$Re_p = \frac{VD}{\nu}$$

Para obtener mejores resultados, la densidad del aire se puede calcular con la ley de gas ideal. La presión atmosférica local y la temperatura ambiente se pueden obtener de la página de internet del Servicio Meteorológico Nacional en México² o de Weather Underground para su localidad. El área proyectada, A , puede medirse cuando el paracaídas cae al suelo. La velocidad, V , se determina con la relación entre el recorrido del paracaídas y el tiempo de caída. Ver la table 19.1.

Comentarios

1. Cómo es el comportamiento del C_d al incrementa la masa?
2. Qué sucedería si se modifica la geometría del paracaídas?
3. Qué sucedería si dejamos caer el paracaídas en un recipiente lleno de agua?
4. Utilizando las ecuaciones descritas y los resultados obtenidos, se puede estimar el tamaño de un paracaídas para que una persona de 80 kg de peso aterrice sano y salvo?

²Muchos países tienen este tipo de servicio.

Capítulo 20

Flujo viscoso: oscilaciones

Objetivo

Ver Fig. 20.1. Medir la frecuencia de oscilaciones del líquido en un tubo U y su factor de amortiguamiento.

Materiales

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

Preguntas

1. In la figura 20.1 demuestre que la ecuación que gobierna la dinámica de oscilaciones de un fluido no viscoso es

$$(\rho AL)\ddot{x} + (2g\rho A)x = 0$$

y su frecuencia natural es $\sqrt{2g/L}$.

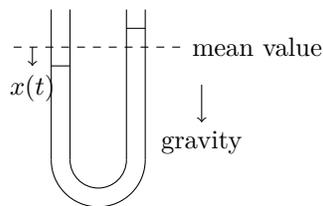


Figura 20.1: Manómetro U

Parte III

**TRANSFERENCIA DE
CALOR**

Capítulo 21

Conducción: estado permanente y conductividad térmica

Objetivo

Observar cualitativamente el efecto de la conductividad térmica de diferentes materiales.

Materiales

- tres cucharas de tamaño similar de los siguientes materiales: madera, plástico y metal.
- recipiente metálico poco profundo, para calentar agua.
- agua.
- estufa.
- varilla de madera.

Procedimiento

Agregar el agua al recipiente y colocarlo sobre uno de los quemadores de la estufa. Encender la estufa a fuego bajo y dejar que se incremente la temperatura por al menos 15 minutos, el tiempo de estabilización puede variar dependiendo de la temperatura del ambiente. Con artículos resistentes al calor improvise una soporte universal, por ejemplo una jarra de barro y un varilla de madera, como se representa en la figura 21.1. Esto ayudará a mantener en la misma posición la cuchara todo el tiempo. Sumergir una a una, uno de los extremos de la cuchara en el agua caliente. Medir el tiempo que tarda en percibirse con la mano el incremento de temperatura en el extremo opuesto de la cuchara. Anotar el resultado en la tabla 21.1.

Bases físicas

Comentarios

- Medir el flujo de calor.

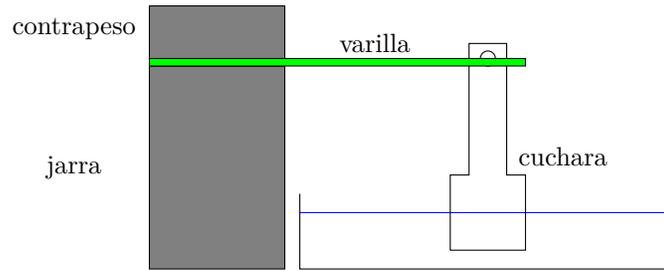


Figura 21.1: Esquema del experimento

Tabla 21.1: Resultados experimentales

Material	Tiempo (s)
Madera	
Plástico	
Metal	

-
-

Preguntas

1. ¿A qué atribuye los tiempos registrados para cada cuchara?
2. ¿Habría algún cambio si se utiliza una cuchara de diferente geometría?
3. Comparar la conducción térmica de un líquido (agua) y un gas (aire)

Capítulo 22

Conducción: temperatura transitoria

Objetivo

Estudiar experimentalmente la transferencia de calor en estado transitorio y comparar los resultados obtenidos con un modelo matemático desarrollado utilizando parámetros concentrados.

Materiales

- Una papa de 5 cm de diámetro aproximadamente y lo más esférica posible.
- Un termómetro médico.
- Recipiente para hervir agua.
- Guantes de cocina.
- Hielos.

Procedimiento

Agregar agua en el recipiente, calentar el agua en la estufa. Una vez que está hirviendo el agua incorporar la papa y esperar al menos 20 minutos. Quitar de la estufa el recipiente y sacar la papa del agua con ayuda del guante de cocina. Secar perfectamente la papa. Posteriormente, se inserta cuidadosamente el termómetro en la papa. Colocar la papa en una superficie plana, en un cuarto sin corrientes de aire. Tomar la temperatura de la papa a intervalos regulares de tiempo. Anotar los resultados en la tabla 22.1.

El modelo analítico que simula la transferencia de calor en estado transitorio de la papa, utilizando parámetros concentrados es

$$T_{ana}(t) = T_{\infty} + (T_i - T_{\infty}) \exp\left(-\frac{hA_s}{\rho V c} t\right),$$

donde el término $\rho V c / h A_s$ se conoce como constante de tiempo, τ . T_i es la temperatura medida al insertar el termómetro en la papa, h es el coeficiente convectivo (10 W/m²K es

Tabla 22.1: Temperatura experimental de la papa

tiempo	T_{exp} (°C)

Tabla 22.2: Temperatura analítica de la papa

tiempo	T_{ana} (°C)

una buena aproximación), A_s es el área de la superficie de la papa, ρ la densidad de la papa, y c es el calor específico. Los últimos dos valores pueden encontrarse en el internet.

Sustituir los valores respectivos y obtener el modelo. Calcular valores de la temperatura para diferentes tiempos y anotarlos en la tabla 22.2. Presentar los datos analíticos y experimentales en una gráfica similar a la figura 22.1.

Bases físicas

Comentarios

▪

Preguntas

1. ¿Qué condición se necesita cumplir para que el modelo de parámetros concentrados sea válido?
2. ¿Cómo es el comportamiento de los resultados experimentales respecto a los resultados analíticos?
3. ¿A qué atribuye las diferencias en las curvas obtenidas?
4. Determina la difusividad térmica de concreto.

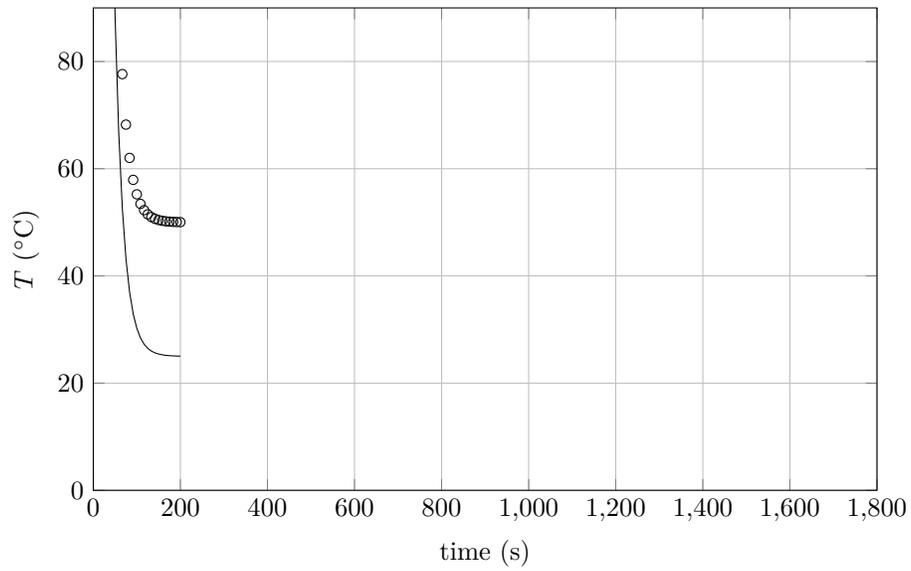


Figura 22.1: Comparación de resultados experimentales (o) y analíticos (—) para la transferencia de calor en estado transitorio.

Capítulo 23

Conducción: material compuesto

Objetivo

Dos materiales en serie.

Materiales

-

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

-

Preguntas

1. Usar las temperaturas y el flujo de calor a través de hojas de dos metales para determinar el coeficiente de conducción del compuesto.

Capítulo 24

Convección natural: placa plana

Objetivo

Estudiar el comportamiento de la capa límite térmica, δt , en una placa plana vertical a diferentes temperaturas.

Materiales

- Una plancha
- Una lámpara de mano, preferentemente de led.
- Una cinta métrica¹

Procedimiento

Colocar la plancha sobre una superficie segura (no inflamable), de tal forma que la superficie caliente se encuentre en posición vertical, y a 20 cm de una pared (preferentemente de color blanco). Realizar el experimento en un cuarto libre de corrientes de aire. Pegar la cinta métrica a la pared en posición horizontal, a la altura media de la plancha. Encender la plancha en el nivel más bajo posible y dejar que el control ON-OFF de temperatura comience a actuar. Una de las complicaciones al estudiar la transferencia de calor por convección, es que los fluidos son translúcidos y no podemos ver a simple vista los gradientes de temperatura y por ende la forma en que se desplazan. Para ello se utilizaría una versión simplificada (sin elementos ópticos) de la técnica shadowgraph. El arreglo del experimento se muestra en la figura 24.1. Desplazar la fuente de luz hasta que se vea una imagen nítida en el muro. Medir el espesor de la capa límite térmica para al menos cuatro potencias diferentes de la plancha. Anotar los resultados en la tabla 24.1.

Bases físicas

Comentarios

-

¹También conocido como metro de carpintero, metro plegable, etc.

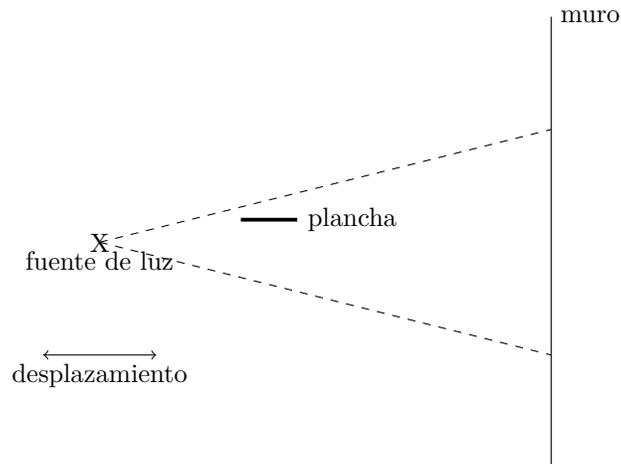


Figura 24.1: Esquema del experimento para placa plana.

Tabla 24.1: Resultados experimentales

Potencia	δ (mm)
baja	
media	
alta	
very-hot	

Preguntas

1. ¿Cuál es el fenómeno que nos permite observar el comportamiento de la capa límite térmica?
2. ¿Cuál es el comportamiento de la capa límite térmica al incrementar la potencia de la plancha?
3. Visualiza la convección natural alrededor de un foco eléctrico.

Capítulo 25

Convección natural: visualización

Objetivo

Observar la transferencia de calor por convección natural.

Materiales

- Pintura vegetal en polvo, de color rojo
- 50 ml de leche entera
- Recipiente rectangular para calentar agua, preferentemente refractario
- Fuente de calor (estufa)

Procedimiento

Ver la figure 25.1. LLenar el recipiente con agua, hasta tres cuartas partes de su capacidad, y colocar uno de sus extremos sobre la fuente de calor. Agregar un poco de pintura vegetal a la leche y mezclar perfectamente. Con ayuda de un popote¹, inyectar cuidadosamente la leche tintada al fondo del recipiente, del mismo lado del quemador, como se muestra en la figura 25.1. Encender la estufa a fuego lento y observar que sucede con la leche tintada. Se puede utilizar leche saborizada, que ya incluye colorantes artificiales.

Bases físicas

Comentarios

▪

¹Ver note de pie en la p. 20

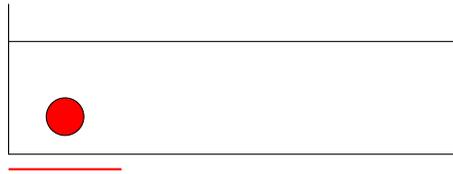


Figura 25.1: Esquema del experimento para visualización.
Analysis of energy transport behavior and geometric effects in graphenena

Preguntas

1. ¿Qué pasa con la leche?
2. ¿Cuál es el fenómeno involucrado en el desplazamiento de la leche?
3. ¿Qué sucede si se incrementa la intensidad de la llama de la estufa?
4. Demuestra que en convección natural las condiciones iniciales pueden determinar el estado permanente.

Capítulo 26

Convección natural: Rayleigh-Bénard

Objetivo

Observar el fenómeno de convección de Rayleigh-Bénard.

Materiales

- una cacerola amplia y poco profunda
- aceite vegetal comestible
- harina de arroz
- estufa

Procedimiento

Colocar la cacerola sobre un quemador de la estufa, se recomienda utilizar una cacerola de barro. Agregar aceite vegetal hasta formar una capa uniforme de 0.5 cm aproximadamente. Asegurarse que el quemador se encuentra nivelado. Encender la estufa, con la flama más pequeña posible. Esperar aproximadamente cinco minutos hasta que se caliente el aceite. Espolvorear cuidadosamente la harina en la superficie del aceite. Observar los patrones de flujo generados. Fotografiar o dibujar los patrones de flujo. Si se dificulta la visualización colocar una fuente de luz en la parte superior de la cacerola y probar con diferentes ángulos de observación.

Bases físicas

Comentarios

- ‘¿Cómo son los patrones de flujo se forman?’

Preguntas

1. ¿Cuál es la diferencia con el experimento “Convección natural”
2. ¿Afectaría el resultado si se inclina la cacerola?
3. ¿Qué pasa con los patrones de flujo si se golpea la cacerola?

Capítulo 27

Convección: forzada y libre

Objetivo

Observar el efecto de la convección forzada en la transferencia de calor por convección.

Materiales

- hielo
- dos recipientes poco profundos
- ventilador o secadora de cabello

Procedimiento

Congelar previamente agua en un recipiente cilíndrico de aproximadamente un litro de capacidad, los botes de yogurt funcionan bien. Se utilizarán dos bloques de hielo similares. Colocar un bloque cilíndrico de hielo cada recipiente. Al lado de uno de los bloques de hielo colocar el ventilador o secadora de cabello, de forma que el flujo de aire generado no incida en el bloque de hielo vecino. Accionar el ventilador en a velocidad mínima. Medir el tiempo que tarda en descongelarse cada uno de los bloques, una cuarta parte, la mitad, tres cuartas partes y completamente. Anotar los resultados en la tabla 27.1. Se aconseja realizar el experimento en un cuarto libre de corrientes de aire. En caso de utilizar la secadora de cabello, no encender la resistencia eléctrica. *Opcional:* Realizar el mismo experimento para las velocidades media y alta del ventilador.

Bases físicas

Comentarios

- ¿Cuál es el efecto del ventilador en el descongelamiento del hielo?
- ¿Qué parámetro del experimento se modifica con flujo de aire generado por el ventilador?

Tabla 27.1: Resultados experimentales

Preguntas

1. ¿Considera importante a geometría del bloque de hielo?
2. ¿Qué otro parámetro considera relevante en el descongelamiento del hielo?
3. ¿Qué pasaría si se enciende la resistencia de la secadora de cabello?
4. Determinar el coeficiente de convección para la convección natural de un objeto caliente.

Capítulo 28

Convección forzada: constante de tiempo

Objetivo

Para calentamiento de un cuarto, la cocina o un dormitorio; usando un horno convencional, horno de microondas, olla de presión, pan en un tostador, hervir agua en jarra eléctrica. También con una jarra eléctrica determinar la relación entre el tiempo necesario para hervir dos tazas de agua comparado con una. Debería ser 2 pero quién sabe con las pérdidas convectivas. La ventaja es que faltando una jarra eléctrica se puede hacer lo mismo en la estufa.

Materiales

- ?

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

- ?

Preguntas

1. Calentamiento eléctrico. Es común que las casas tengan bombas de agua (de 1/4 hp a 3/4 hp, todos a 120 V) que se usan para subir el agua de una cisterna al tinaco. Medir la constante de tiempo de la temperatura en el exterior de la bomba.
2. Se podría hacer con una televisión, todas son planas en su parte posterior, se enciende y se monitorea la temperatura hasta que se estabilice. La parte trasera de un refrigerador es plana también y se puede medir la constante de tiempo ahí.

3. Mide la constante de tiempo de la temperatura del procesador de una computadora¹. Hay programas que permiten monitorear el estado del microprocesador incluyendo la temperatura.
4. Medir la temperatura en la salida de una manguera conectada a agua caliente como función de la longitud de la manguera.

¹Ver la nota de pie en la p. II

Capítulo 29

Convección forzada: ebullición

Objetivo

Variación del punto de ebullición con la temperatura en una olla de presión.

Materiales

- ?

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

- ?

Preguntas

1. Demuestra que el agua vaporizada puede aplicar fuerza.
2. Demostrar la condensación de película y por gotas alrededor de una lata de refresco fría.

Capítulo 30

Transferencia de masa: proceso de mezcla

Objetivo

Con una cuchara mezclar leche en café. ¿cuanto tiempo necesita?

Materiales

- ?

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

-

Preguntas

1. Mide la tasa de evaporación de agua de un recipiente.

Capítulo 31

Radiación: emisividad de superficies

Objetivo

Observar y medir cualitativamente el efecto del color de una superficie y del acabado superficial en la transferencia de calor por radiación.

Materiales

- Hojas de papel de diferentes colores (blanco, gris, negro)
- Papel aluminio para cocinar
- Mesa de madera o cualquier base de material aislante

Procedimiento

Cortar las hojas de papel en cuadrados de 10 cm por lado. Pegar con cinta adhesiva¹ las hojas a la mesa de madera y sacarla a un área donde incidan directamente los rayos del sol en las hojas, preferentemente evitar corrientes de aire. Esperar aproximadamente 15 min. Colocar la palma de la mano en cada una de las hojas, comenzando por la hoja de color claro y finalizar con la de color oscuro. Anotar las experiencias con cada una de ellas. Realizar el mismo procedimiento con el papel aluminio. Cortar dos hojas de 10 cm de lado, y pegarlas en la mesa de madera, teniendo cuidado de colocar una con la opaca y la otra con la cara pulida hacia arriba.

Bases físicas

Comentarios

- ¿Cuál de las hojas de papel tiene una mayor temperatura?
- ¿A qué se debe lo anterior?

¹También se conoce como diurex, cinta Scotch, etc.

Preguntas

1. ¿Cuál de las hojas de papel aluminio tiene una mayor temperatura?
2. ¿A qué atribuye la diferencia de temperatura en el aluminio?
3. ¿Para cocinar más rápido, qué lado del papel aluminio usaría en dirección a la comida?
4. Determinar la relación de emisividades de dos superficies.

Capítulo 32

Radiación: ley de distancia

Objetivo

Que la intensidad de radiación disminuye como la cuadrada de la distancia de la fuente.

Materiales

- una fuente de luz como lámpara
- una regla para medir distancia
- un teléfono celular para medir la intensidad de luz
- ambient light sensor: intensity (lux = lumen/m²) vs. distance (m)

Procedimiento

Orientación con respecto la fuente constante, la distancia variable.

Bases físicas

Comentarios

- ?

Preguntas

1. Medir la intensidad como función del ángulo de la orientación, manteniendo la distancia entre la fuente y el receptor constante.
2. Dibujar la líneas que representan las superficies de intensidad constante.

Capítulo 33

Radiación: luz infrarroja

Experimento de Herschel

http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/classroom_activities/herschel_experiment2.html

Objetivo

Muestra que en el espectro de la luz solar la temperatura en la zona por debajo de la roja tiene mayor temperatura.

Materiales

- ?

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

- ?

Preguntas

1. ¿Dónde está la temperatura máxima en la parte visible del espectro solar?
2. ¿Qué sucede en el otro lado del espectro solar, en la región ultravioleta?
3. Buscar la radiación infrarroja en la luz emitida de una estufa de gas.

Capítulo 34

Radiación: ley de Beer

Objetivo

Determinar la absorción de la radiación en líquidos

Materiales

- ?

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

- ?

Preguntas

1. En una piscina de agua mide la intensidad de luz con profundidad.
2. Mide la intensidad de luz atrás de uno y varios cristales de vidrio.
3. Determina la variación de la intensidad de radiación con ángulo y comparar con la ley de coseno de Lambert.

Capítulo 35

Modos combinados: conducción con convección

Objetivo

Calentar un objeto (piedra, vegetal, etc.) con el sol que se enfría por el viento.

Materiales

- ?

Procedimiento

Bases físicas

Comentarios

- ?

Preguntas

1. Mide la distribución de temperatura a lo largo de una aleta de enfriamiento.
2. Determina la variación de la temperatura de un calentador al aumentar la velocidad del aire alrededor.