



FACULTAD DE INGENIERIA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**ROGELIO GONZALEZ OROPEZA
FELIX NUÑEZ OROZCO**

**PRACTICAS DE
TERMODINAMICA**

**DIVISION DE CIENCIAS BASICAS
DEPARTAMENTO DE FISICA**



FACULTAD DE INGENIERIA

PROLOGO

La misión de la ingeniería consiste en la explotación racional de la naturaleza para la satisfacción de las necesidades del género humano.

Esta explotación consiste en la extracción de recursos, renovables o no, o en la modificación del medio ambiente.

Para que la ingeniería cumpla cabalmente con su misión se requiere de un conocimiento profundo de la naturaleza y de las leyes que rigen los fenómenos naturales.

El objetivo del Laboratorio de Termodinámica consiste en la presentación de una serie de fenómenos físicos de tal manera que el estudiante de ingeniería comprenda los principios que los rigen y pueda, eventualmente, aplicarlos a situaciones que ha de enfrentar en su vida profesional.

Estas conductas se pueden desarrollar sólo mediante la gufa cuidadosa y sistemática desde los experimentos más sencillos, en donde el alumno manipula los instrumentos más cotidianos hasta aquellos en donde el análisis de los resultados experimentales desplaza en importancia a la manipulación mecánica del equipo.

El presente cuaderno de prácticas tiene dos características que lo diferencian de las versiones precedentes: aparte de los cuestionarios y de la presentación de los experimentos, se incluyen otras secciones que dan una información muy amplia. En uno de los apéndices se incluye una introducción al manejo de los datos experimentales, con definiciones y ejemplos; en otro aparece la descripción y cuidado del equipo que existe en el laboratorio y en otra más, se describen las partes que deben aparecer en un reporte de las actividades para que sea claro y conciso. Finalmente se incluye el reglamento del laboratorio, incluyendo los servicios que se ofrecen al alumno.

La segunda característica se encuentra en el formato de las prácticas en sí; en cada una de ellas se puede encontrar el tema al que corresponde, los objetivos de aprendizaje y una sección de antecedentes, en donde se desarrollan ideas y conceptos que son importantes en el experimento que se trata. A continuación se en lista el equipo necesario y se ilustra su montaje gráficamente. Luego viene el desarrollo del experimento. Posteriormente aparece una sección dedicada a la discusión de la práctica. Aquí se pueden encontrar varias preguntas que se van aclarando conforme se desarrolla el experimento y que se recomienda que se incluyan en el informe. Finalmente se encuentra la sección de aplicaciones en la que se presentan algunos problemas o la descripción de la apli cación de los hallazgos del experimento a situaciones reales. Las referencias bibliográficas son claras y directas para que el estu diante encuentre sin dificultades la información deseada. De nin- guna manera se debe considerar que la bibliografía que se presenta es la única. Lo que se pretende es la presentación de un míni mo de aplicaciones que reafirmen y aumenten el interés del alumno, quien podrá encontrar aplicaciones en muchos otros campos y de mu chas otras fuentes.

El alumno encontrará que, si trabaja seriamente con este cu aderno, su habilidad se irá desarrollando paulatinamente, desde la comprensión pasiva hasta la de las técnicas nuevas y mejores.

Los autores esperan que esta obra sea de utilidad para los usuarios, principalmente para los estudiantes, y expresan su deseo de conocer los comentarios que permitan mejorar este cuaderno.

También queremos agradecer a los señores Joel y Ernesto Mota Lozano, por su apoyo eficaz en la revisión de este material. Asimismo, a las señoritas Angela Martínez Aldana y Ma. Alejandra Trejo Sotelo por la mecanografía del mismo.

Rogelio González Gropeza
Félix Núñez Orozco

México, D. F., septiembre de 1986.

CONTENIDO

	Págs.	
Práctica 1.	Presión Hidrostática	01
Práctica 2.	El termómetro de gas o volumen constante	05
Práctica 3.	El equivalente mecánico de calor	09
Práctica 4.	Capacidad térmica específica y entalpía de vaporización del agua.	14
Práctica 5.	Ecuación de Clausius - Clapeyron	18
Práctica 6.	Constante particular (R) y coeficiente de compresibilidad isotérmico (β_T) del aire.	22
Práctica 7.	Índice adiabático y capacidades térmicas específicas (C_p , C_v) a presión y a volumen constantes del aire.	28
Práctica 8.	Coeficiente de Joule - Thomson	33
Práctica 9.	Venturi y bomba de agua	37
Práctica 10.	Motor de aire caliente (Stirling) operando como máquina térmica.	48
Práctica 11.	Motor de aire caliente (Stirling) operando como bomba de calor.	58
Práctica 12.	Refrigerador por compresión de vapor	64
Apéndice A.	Cuestionarios previos a cada práctica.	68
Apéndice B.	Tratamiento estadístico de los datos experimentales.	81
Apéndice C.	Uso y cuidados del equipo	113
Apéndice D.	Reglamento y formas utilizadas en el Laboratorio de Termodinámica.	149

PRACTICA 1
PRESION HIDROSTATICA

- OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

EL ALUMNO:

- 1.- Establecerá (a partir de la evidencia experimental) el modelo matemático del gradiente de presiones hidrostático .
- 2.- Construirá un barómetro de Torricelli y con éste, calculará la presión atmosférica en el laboratorio.

- ANTECEDENTES

La Termodinámica macroscópica se ocupa de los sistemas que contienen un número muy grande de partículas y en este caso, es conveniente considerar a la materia como un medio continuo, es decir se le considerará sin interrupción en el espacio.

Con base en lo enunciado anteriormente, se puede hablar de las propiedades termodinámicas de una manera más sencilla, esto es, como un promedio de su valor en cada punto. Así:

$$\rho \text{ (densidad)} = m/V$$

$$(\rho) = \text{kg/m}^3$$

$$v \text{ (volumen específico)} = 1/\rho$$

$$(v) = \text{m}^3/\text{kg}$$

$$\gamma \text{ (peso específico)} = mg/V = \text{peso del cuerpo/volumen del cuerpo}$$

$$(\gamma) = \text{N/m}^3$$

como

$$mg = F_g \quad ; \quad \gamma = mg/V = \rho g$$

$$\therefore \gamma = \rho g$$

Respecto a la presión, cuando se trata de sólidos es más o menos comprensible su definición de F/A pero, cuando el sistema en cuestión es un fluido, la expresión anterior ya no es muy clara.

Es posible que el lector haya experimentado una sensación desagradable en los oídos al estar sumergido en una piscina; la sensación se agudiza a una mayor profundidad y disminuye al ascender a la superficie. El fenómeno se explica como la acción de la presión que ejerce el agua sobre los oídos, una parte muy sensible del organismo*.

* Física, Kane & Sternheim. p. 412-414 (Descrip. del oído humano).

El aumento en la presión afecta al tímpano. En el caso opuesto (es decir, cuando la presión es muy pequeña) se tienen también consecuencias desagradables. Este es el caso de los alpinistas que, habiendo escalado grandes alturas, sangran por la nariz sin ninguna razón aparente. Este fenómeno se explica como la ruptura de los vasos sanguíneos de la mucosa nasal, casi a flor de piel, debido a que no resisten la presión sanguínea.

Cuando una persona se encuentra en su ambiente natural, la resistencia de las paredes de los vasos, aunada a la presión ambiente, se equilibra con la presión del torrente sanguíneo. Cuando la presión ambiente disminuye, los vasos no pueden seguir equilibrando la presión sanguínea y viene la ruptura.

Las dos sensaciones que se describen tienen en común que se resalta el hecho de que al cambiar la elevación, el valor de la presión del ambiente cambia también.

En esta práctica se pretende dar un carácter cuantitativo a este hecho al expresarlo en forma matemática. Además, se tomarán medidas de la presión ambiente en el laboratorio para que el estudiante se familiarice con su orden de magnitud.

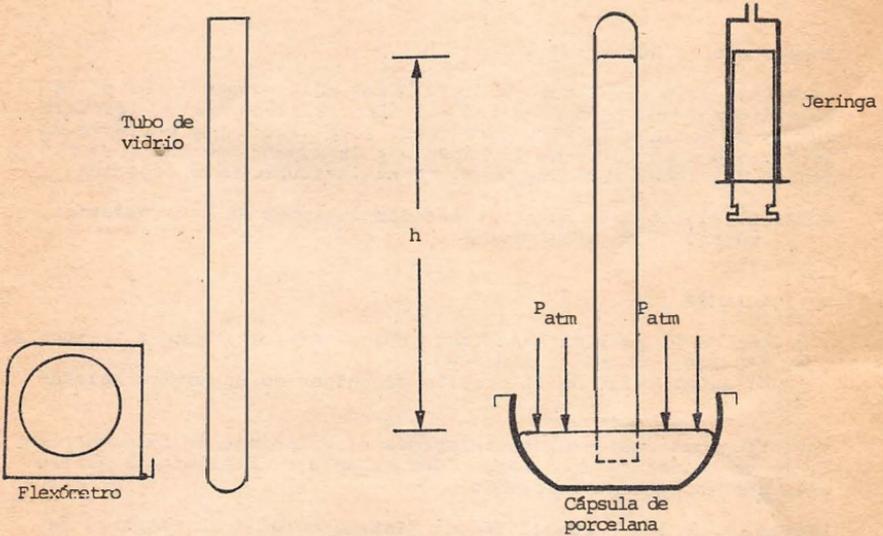
- EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO POR EL PROFESOR

- a) 3 Vasos de precipitados de 800ml.
- b) 1 Soporte Universal.
- c) 1 Pinza para termómetro.
- d) 1 Manómetro diferencial en "U" con alcohol como fluido manométrico.
- e) 1 Campana de vidrio chica (para sumergir en los vasos de 800ml).
- f) 1 Tubo látex (60cm).
- g) 300ml de H₂O. 600ml de alcohol y 600ml de agua.



- EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO POR BRIGADA

- a) Una jeringa de plástico de 20ml.
- b) Una cápsula de barro o porcelana.
- c) 0.65 kg de mercurio.
- d) Un flexómetro.
- e) Un tubo de vidrio de 65cm de longitud y 0.5cm de diámetro interior en un extremo.



- DESARROLLO

- Actividad 1. El profesor hará un experimento demostrativo para poner de manifiesto las variables que determinan el valor de la presión en un fluido en reposo.
- Actividad 2. El profesor indicará la técnica adecuada para que el alumno pueda medir la presión ambiente en el laboratorio. (Se recomienda que se registre un mínimo de 6 lecturas).

- DISCUSION

Respecto a la Actividad 1.

¿Cuál es la relación entre la presión y la profundidad en un fluido en reposo? ($\rho = \text{cte}$).

¿Cuál es la relación entre la presión y la densidad? ($\gamma = \text{constante}$).

¿Cómo se combinan las expresiones precedentes? ¿Cuáles son las dimensiones de la constante de proporcionalidad resultante? ¿Qué magnitud física con las mismas dimensiones es relevante en el experimento?

Respecto a la Actividad 2.

¿Qué sucedería si el tubo midiera 30cm? ¿Qué sucedería si el tubo midiera 90cm? ¿Qué longitud del tubo se llena con el mercurio cuando se inclina 30°? En este caso, ¿qué altura hay entre la superficie del mercurio en la cápsula y la superficie del mercurio dentro del tubo? ¿Qué sucede si no hay mercurio en la cápsula?

NOTA: El alumno debe redactar las conclusiones de esta práctica, basándose en esta sección.

- APLICACIONES

• Medida de la presión sanguínea. Véase "Física", Kane & Sternheim, p. 239-240, John Wiley and Sons.

¿Cuál es el valor de la presión sanguínea de un adulto saludable?

• Investigue en cualquier enciclopedia el principio de funcionamiento de un barómetro anerode. ¿Cómo establece un piloto la altura a la que se encuentra volando?

• Flotación de los cuerpos. Véase: "Introducción a la mecánica de los fluidos" Fox & Mc. Donald p. 86-89. John Wiley and Sons. ¿Qué porcentaje de un "eisberg"* se halla sumergido?

• Averigüe la presión típica a la cual funciona el condensador de una planta termoeléctrica.

Véase: "Ingeniería Termodinámica: Fundamentos y Aplicaciones". Huang. Ejemplos 12.1, 12.2, 12.3, 12.4, 12.5 y 12.6. C.E.C.S.A.

* Palabra alemana que significa literalmente "montaña de hielo".

PRACTICA 2

EL TERMOMETRO DE GAS A VOLUMEN CONSTANTE

- OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

EL ALUMNO:

1. Acoplará los elementos necesarios para construir un termómetro de gas a volumen constante.
2. Calibrará el termómetro en el punto de fusión del hielo.
3. Empleará el termómetro construido y calibrado para medir la temperatura de algunos sistemas.

- ANTECEDENTES

Las fronteras que limitan a los sistemas termodinámicos se pueden clasificar en dos grandes grupos: las *adiabáticas*, que impiden la transmisión de calor, y las *diatérmicas*, que sí la permiten.

Si dos sistemas, A y B, se ponen en contacto a través de una frontera diatérmica, se observa en general que sus propiedades independientes x_A, y_A, z_A, \dots y x_B, y_B, z_B, \dots * sufren una serie de cambios hasta que, eventualmente, cada sistema llega a un estado de equilibrio. Se dice entonces que los sistemas A y B se encuentran en equilibrio térmico.

Si en esta situación se variara el estado de A, las propiedades del sistema B cambiarían de tal manera que, luego de un tiempo suficientemente largo, los sistemas alcanzarían un nuevo estado de equilibrio. Parece ser que basta con colocar a dos sistemas en contacto térmico para que se establezca una dependencia en la forma en que pueden cambiar las propiedades de cada uno. Se podría postular que esta dependencia implica la existencia de una propiedad térmica⁺.

*Las propiedades x, y, z pueden ser la presión absoluta, la densidad, la viscosidad, etc.

⁺Sobre todo si se toma en cuenta que cuando dos sistemas se encuentran en equilibrio térmico aparecen ante nuestros sentidos igualmente calientes, tibios o fríos.

Un hecho experimental permite apoyar esta hipótesis: la Ley Cero de la Termodinámica, la cual enuncia: si dos sistemas C y D están independiente y simultáneamente en equilibrio térmico con un tercer sistema E, entonces ambos sistemas (C y D) están en equilibrio térmico entre sí.

Esto puede ser así si cada sistema tiene una propiedad cuyo valor se iguala a la de los otros sistemas en el equilibrio térmico. A esta propiedad se le llama *temperatura* y la Ley Cero confirma la *transitividad*[†] de esta característica de las sustancias.

De hecho, la Ley Cero de la Termodinámica da la posibilidad de comparar las temperaturas de dos sistemas por medio de un tercer sistema, al cual se acuerda llamar *termómetro*. Para que el uso del termómetro sea eficaz se necesita cuantificar el concepto de temperatura.

Se sabe que si se altera la temperatura de un sistema se alteran también sus demás propiedades, algunas en forma sumamente espectacular. Aquellas que son más cómodas de medir o de observar se escogen como *propiedades termométricas* para, de una forma arbitraria, definir una escala de temperatura.

Sea un sistema con dos propiedades independientes x y y . Una escala de temperatura se puede definir como

$$\theta = c x \Big|_{y = \text{cte}} \quad (1)$$

en donde θ es la temperatura y C es una constante. En el caso de un termómetro de gas ideal, X es la presión absoluta y Y es el volumen. La constante se valúa al elegir un valor arbitrario de la temperatura en un estado definido.

[†]La transitividad es una propiedad de los números reales.

El estado que se elige es el del punto triple del agua y el valor que se señala para la temperatura es 273.16K*. La ecuación 1 se transforma en:

$$C = 273.16 \text{ K}/P_{TR} \quad V = \text{cte} \quad (2)$$

en donde P_{TR} es la presión del fluido termométrico cuando alcanza el equilibrio térmico con el agua en el punto triple.

La relación termométrica queda entonces:

$$\theta = (273.16 \text{ K}/P_{TR})P \quad V = \text{cte} \quad (3)$$

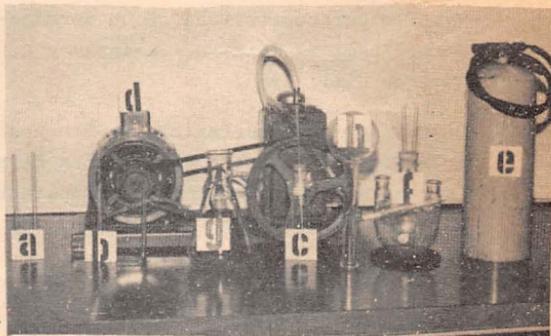
Para conocer la temperatura en cualquier estado, basta con medir la presión de la sustancia que se usa en el termómetro en dicho estado.

De la ecuación 3 se ve que el valor de la temperatura en esta escala (la escala de temperaturas del gas ideal) no tiene que ver con la identidad de la sustancia termométrica.

En esta práctica se verán algunas ventajas y desventajas de un termómetro de gas ideal a volumen constante.

- EQUIPO NECESARIO PARA CADA BRIGADA

- a) 1 Manómetro en U (con un extremo cerrado)
- b) 1 Manómetro igualador
- c) 1 Tubo de ensayo acoplado a un tubo capilar.
- d) 1 Bomba de vacío
- e) 1 Tanque de nitrógeno.
- f) 1 Matraz con 4 entradas
- g) 1 Matraz Erlenmeyer con salida lateral.
- h) 1 Camisa para condensación.



*El estado triple o punto triple de una sustancia pura es aquel en el que existen en equilibrio tres fases, generalmente la sólida, la líquida y la gaseosa. Se da en un conjunto único de las propiedades P y θ . Este valor se escoge para que la unidad de temperatura en esta escala coincida con la unidad en la escala de Celsius. De esta forma, $\Delta_1 K = \Delta_1 ^\circ C$ (Δ_1 es la diferencia unitaria).

- DESARROLLO

Se expondrán las instrucciones adecuadas para armar el dispositivo para detectar y eliminar fugas y para medir la temperatura de al menos tres sistemas.

Se repetirán los pasos anteriores con un valor distinto del estado del fluido termométrico en el punto de calibración.

- DISCUSION

¿Por qué para el llenado conviene alcanzar el máximo vacío de la bomba?

¿Qué desventajas tiene el uso del aire ambiente como sustancia termométrica ¿Cómo se garantiza que el volumen del fluido termométrico permanece constante? ¿Cuál es la ventaja de tener un valor pequeño de P_{cal} ? ¿Qué aspecto tiene el conjunto de puntos experimentales (θ) en un plano coordinado (P_{cal} , θ)? ¿Qué representa el punto de intersección de esta curva y el eje de las ordenadas?

P_{cal} = presión de calibración

- APLICACION

- . Vea las características de un termómetro de gas ideal en "Calor y Termodinámica" de M. W. Zemansky y R. H. Dittman, p. 16.6a. Ed. Mc Graw Hill, 1985.
- . Busque las características de la escala de temperaturas del gas ideal (en la página 17 de la obra de Zemansky y Dittman) y compárela con la escala práctica de temperatura internacional (en la Enciclopedia Británica, tomo 18, p. 324 (1980).

PRACTICA 3

EL EQUIVALENTE MECANICO DEL CALOR

OBJETIVOS DEL APRENDIZAJE:

EL ALUMNO:

1. Comprobará la equivalencia cuantitativa entre el calor y el trabajo.
2. Calculará el cambio en la energía interna de un sistema cerrado.

ANTECEDENTES:

Las observaciones de los fenómenos en que intervenía la temperatura, como el calentamiento o enfriamiento de los cuerpos, se cuantificaron mediante la definición del calor.

En el siglo XVII Joseph Black* estableció que había fenómenos de la misma naturaleza de los considerados como "calor" pero que no se manifestaban en una variación en la temperatura del sistema. A raíz de estas observaciones se definieron dos tipos de calor: el sensible (durante la transmisión del cual un cuerpo varía su temperatura) y el latente (que no provoca una variación en la temperatura del sistema. Ocurre normalmente en los cambios de fase a $P = \text{cte}$).

La unidad para medir estos fenómenos era la caloría. Esta unidad parecía no tener ninguna relación con las variables mecánicas, tales como trabajo, energía cinética o potencial.

Sin embargo, a principios del siglo XIX se especulaba con la idea de que el calor no era sino una manifestación de los fenómenos mecánicos. En aquellos días, no obstante, había muchos científicos que consideraban al calor y a los fenómenos mecánicos como manifestaciones totalmente diferentes e independientes. Para confirmar cualquiera de los puntos de vis

*Véase la pág. 22 de "The Second Law" de H. A. Bent, Oxford University Press, 1965.

ta se requería de experimentos que arrojaran resultados cuantitativos y objetivos. Normalmente se acredita a James P. Joule como el autor de los citados experimentos, aunque algunos investigadores habían anticipado las conclusiones aún antes que Joule¹.

Los experimentos se llevaron a cabo entre 1843 y 1849 y los resultados de Joule fueron al principio rechazados completamente o ignorados por la comunidad científica de su tiempo². Sin embargo, gracias a la intervención de William Thomson, se le permitió a Joule publicar sus resultados, los que condujeron eventualmente al enunciado del postulado general de la conservación de la energía, conocido actualmente como la Primera Ley de la Termodinámica.

Joule empleó una gran diversidad de esquemas para efectuar sus experimentos³, uno de los cuales se describe a continuación. En un recipiente de paredes adiabáticas se hallaba una cantidad conocida de agua destilada. Las paredes permitían la inserción de termómetros y el paso de un alambre conductor, el cual alimentaba a un resistor inmerso en el agua interior. En la parte exterior se hallaba un generador eléctrico, el cual se movía gracias al trabajo mecánico que se conseguía al dejar caer un cuerpo de masa conocida desde una altura conocida un número determinado de veces. De esta manera se producía en el generador una corriente eléctrica, la cual, al pasar por el resistor, calentaba el agua.

¹Veáse los comentarios acerca de estos investigadores en la p. 218 de "Física", versión S.I. de J. W. Kane y M.M. Sternheim, John Wiley & Sons, 1980.

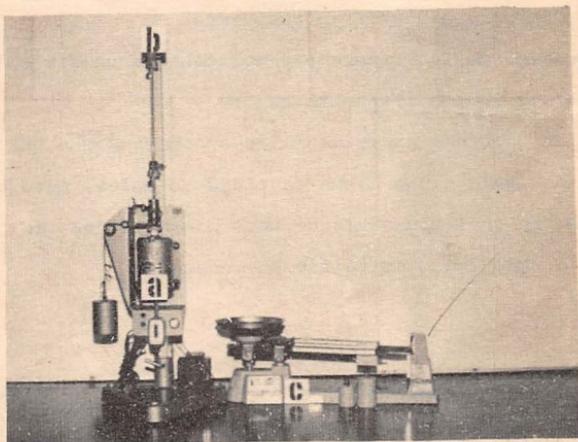
²Veáse la p. 14 de la obra citada previamente de H. A. Bent.

³Veáse el artículo "Internal energy and the first law", pp 15-16 de "The principles of chemical Equilibrium" de K. Denbigh, Cambridge University Press, 1973.

(Por cierto, este fenómeno de calentamiento se conoce en "Electricidad y Magnetismo" como el efecto de Joule). Al cuantificar el trabajo mecánico y el "calor" que hubiera provocado el mismo cambio en la temperatura del agua, Joule encontraba siempre la misma cifra (dentro de las incertidumbres experimentales, naturalmente). En el experimento del que se habla, su resultado fue de 838 (lb·ft) por cada Btu. Este experimento se realizó en 1843.

EQUIPO Y MATERIAL POR BRIGADA:

- a) Un aparato del equivalente mecánico del calor.
- b) Un termómetro de -10°C a 110°C .
- c) Una báscula de 2610 g.



DESARROLLO

El profesor indicará el manejo del aparato del equivalente mecánico de calor, especificando su principio de funcionamiento.

Dado que la equivalencia entre el calor y el trabajo significa que una misma cantidad de trabajo produce el efecto de una misma cantidad de calor en todos los casos, es conveniente que se tomen 6 conjuntos de datos, como mínimo.

DISCUSION

Si se desea medir la temperatura de un líquido que está en un recipiente, ¿qué inconveniente se tiene al estar el bulbo del termómetro en contacto con la pared del recipiente?

Si se lleva a cabo un proceso rápidamente (en unos pocos minutos) ¿sería razonable decir que "no hay tiempo" para que se establezca la transmisión de calor? ¿Cómo argumentaría su respuesta?

¿Cuál es la expresión de la Primera Ley aplicable a un sistema cerrado que recibe trabajo y que no transmite calor?

En cada una de las corridas experimentales se observa que una cantidad dada de trabajo equivale a una misma cantidad de calor, pero este hecho se basa en un cambio en temperatura de unos pocos grados. ¿Cómo garantizaría usted que el resultado es válido en general?

APLICACIONES

Medida de la eficiencia de una máquina térmica. Veáanse el artículo 12.1 y los ejemplos resueltos 12.3.1. (p. 475) y 12.3.2. (p. 476) de "Física para ciencias e ingeniería" de J.P. McKelvey y H. Grotch, Harla, 1980. Un ciclo productor de energía recibe 1380.3 (Btu) en la caldera y 233.1 (Btu) en el recalentador, entregando 764.583 kJ como trabajo neto. ¿Cuál es la eficiencia del ciclo?

- Aprovechamiento de la energía de los alimentos. Véase el ejemplo resuelto 17.4, p. 363 de "Física" de R. Q. Serway, Ed. Interamericana, 1985. Acerca del metabolismo humano, véanse los artículos "El metabolismo humano" y siguientes, pp. 225 y siguientes, de Física, versión S.I. de J. W. Kane y M. M. Sternheim, John Wiley & Sons, 1980. Calcule la altura a la que podría llegar un alpinista si pudiera transformar completamente la energía de un chocolate (150 calorías dietéticas) en trabajo de desplazamiento vertical.
- Aire acondicionado. Una razón de la necesidad del aire acondicionado es la generación de energía por parte de los seres de sangre caliente. Véase el artículo "El control de la temperatura en los animales de sangre caliente", p. 211 y siguientes de "Física", versión S.I., de J. W. Kane y M.M. Sternheim, J. Wiley & Sons, 1980. Véase el ejemplo resuelto 2.6, p. 55 de "Termodinámica" de J. P. Holman, Mc Graw - Hill, 2a. Ed., 1974. Se diseña un acondicionador de aire del tipo de ventana para eliminar 3 M cal/h mediante el consumo de 895 W de la línea eléctrica. ¿Cuánto calor se entrega a los alrededores?
- Refrigeración. Las "cargas de refrigeración" se dan normalmente en unidades térmicas: cal o Btu. Véase p. 183 de "Principios de Refrigeración" de R. S. Dossat, 2a. Ed. John Wiley & Sons, 1978. Se necesitan 80 calorías para fundir 1 g de hielo a 0°C, transformándolo en agua a 0°C. Para referirse a la capacidad de un refrigerador se define la tonelada de refrigeración como el calor que hay que retirar para congelar 2000 lb de agua a 0°C, pasándolas a 2000 lb de hielo a 0°C en 24 horas. Exprese esta cifra en kW.

La constante de proporcionalidad se llama, "capacidad térmica específica" y no es una verdadera constante, pues tiene un valor distinto para cada sustancia. Y aún en el caso de una misma sustancia se ha descubierto que varía con la naturaleza del proceso de la transmisión de calor (a presión constante, a volumen constante) y con el valor de la temperatura del sistema. Esto implica que no es equivalente variar a un sistema de 10°C a 20°C que variarlo de 80°C a 90°C. En ambos casos la variación en la temperatura es igual, pero el valor de la temperatura es diferente.

Existe una transmisión de calor aparte del calor sensible, cuyo efecto no es la variación en la temperatura de un sistema. Como parece que el "efecto" de la transmisión de calor se "oculta" en la masa del sistema, se decidió llamar a esta interacción: calor latente.

Esta transmisión de calor tan peculiar tiene lugar cuando la sustancia* está cambiando de fase. De ahí que el calor latente se llama de cambio de fase (de sublimación, de fusión o de vaporización, según sea el caso).

Se puede cuantificar la transmisión de calor latente al observar que es proporcional a la cantidad de sustancia que cambia de fase.

$$Q \propto m$$

La proporcionalidad se elimina mediante la introducción de una "constante".

$$Q = \lambda \cdot m$$

Como en el caso del calor sensible, la "constante de proporcionalidad" no es una verdadera constante, pues tiene un valor diferente para cada sustancia. Aún hablando de una cierta sustancia, el valor de λ (el calor latente específico) depende del valor de la temperatura a la cual se lleve a cabo el cambio de fase.

Los cambios de fase ocurren a temperatura constante, pero también la presión se mantiene constante. Esto quiere decir que se fija el valor de la temperatura de cambio de fase al fijar la presión.

Debido a lo anterior, se puede decir que el calor latente específico depende de la presión a la que se lleve a cabo el cambio de fase.

Es posible comprobar que la capacidad térmica específica (c) y el calor latente específico (λ) son propiedades de la sustancia. Más aún, hablando del calor latente específico, se verá más adelante en el curso que, se encuentra relacionado directamente con el trabajo de expansión isobárico (el cual resulta ser una diferencia de propiedades termodinámicas) y con el cambio en la energía interna (que es otra propiedad termodinámica). Ambos conceptos energéticos se combinan en uno llamado entalpía y es por ello que el nombre que se prefiere dar actualmente al calor latente de cambio de fase es "la entalpía de cambio de fase". Particularmente, en esta práctica se trata de la entalpía de vaporización.

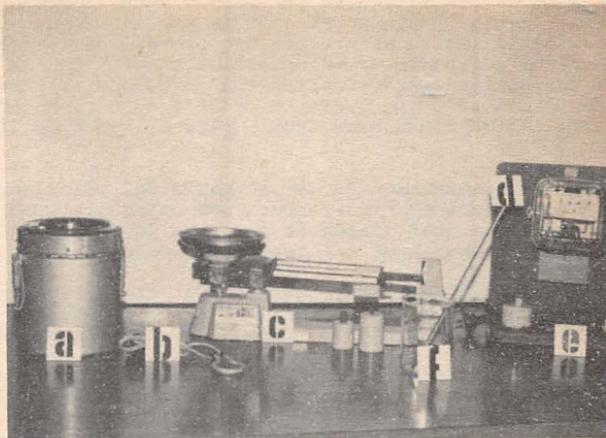
$$\lambda = h_{fg} \quad (\text{entalpía de vaporización})$$

$$Q = m h_{fg}$$

(*) esto ocurre sólo en las sustancias puras.

- EQUIPO NECESARIO PARA CADA BRIGADA

- a) 1 Calorímetro de vacío
- b) 1 Resistencia de inmersión de 250 W
- c) 1 Báscula de 2610 g con su juego de pesas
- d) 1 Termómetro de rango de -20°C a 110°C
- e) 1 Watthorímetro
- f) 1 Vaso de precipitado de 400 ml.



- DESARROLLO

Actividad 1. El profesor indicará la técnica adecuada para que, el alumno tome los datos necesarios que le permitan calcular la capacidad térmica específica del fluido elegido. Se recomienda tomar un mínimo de seis conjuntos de datos.

Actividad 2. El profesor indicará la técnica adecuada para que el alumno tome los datos necesarios que le permitan calcular la entalpía de vaporización de la sustancia elegida. Se recomienda tomar un mínimo de seis conjuntos de datos.

- DISCUSION

Respecto a la actividad 1:

¿Cómo se transmite el calor que recibe el fluido? ¿Se puede asegurar que el calor lo reciba íntegramente el líquido y que no haya transmisión al medio ambiente? ¿Cuál es la mejor manera de medir la masa del líquido? ¿Cómo está construido el vaso del calorímetro? ¿Cuál es la condición que se debe satisfacer para que la repetición de las lecturas sea un procedimiento válido? ¿Cómo se afectaría el experimento si el vaso del calorímetro se sustituyera por uno de cobre?

Asegúrese de obtener los valores promedio y las incertidumbres de las magnitudes físicas que son necesarias para obtener el valor de la capacidad térmica específica del fluido elegido.

Respecto a la actividad 2:

¿Qué tanto afecta a los cálculos el hecho que el recipiente del calorímetro absorba calor? ¿Se puede aseverar que no hay pérdidas de calor al ambiente, a pesar de la producción de vapor que escapa del calorímetro? ¿Cómo cuantificaría la masa que cambia de fase? ¿Cómo se afectaría el resultado si el vaso del calorímetro se sustituyera por uno de cobre?

¿Qué gasto de agua se necesita para condensar el vapor que se está generando? (en las condiciones que sale de las llaves del laboratorio).

NOTA: El alumno debe redactar las conclusiones de esta práctica basándose en esta sección.

- APLICACIONES

Compare los valores obtenidos en las actividades 1 y 2 con los valores pertinentes que aparecen las "Tablas de vapor" de L. Haar, J. S. Gallagher y G. S. Kell, tablas 1 y 5, respectivamente, Ed. Interamericana, 1985.

- . El agua, debido tanto a su abundancia como a su gran capacidad térmica específica, se emplea como un fluido de calentamiento o de enfriamiento. Véase "Procesos de transmisión de calor" de D. O. Kern, Ej. resuelto 7.6, p. 161 Mc Graw Hill, 1950.
- . La influencia del agua en el clima de la tierra. Véase "La sustancia más extraordinaria en el mundo", de I. V. Petrianov, p. 74, Ed. Mir, 1980.

Explique por qué en el día la temperatura en los desiertos tropicales es tan elevada y es tan baja durante la noche.

- . El empleo del agua en ciclos productores de potencia. Véase por ejemplo, "Los fundamentos de la Termodinámica clásica" de G. J. Van Wylēn y R. E. Sonntag, ej. resuelto 9.2 p. 303, John Wiley & Sons. ¿Cuánta agua de servicio se requiere en el condensador del ejemplo, si su temperatura no debe variar más de 12°C? Haga el cálculo por cada kg/h de vapor de agua.
- . El efecto refrigerante de la evaporación del agua. Investigue cuánto calor se necesita para evaporar 1.5 kg de sudor de un ser humano. Vea la sección 12.7 "El control de la temperatura en los animales de sangre caliente", p. 211 de "Física" de J. W. Kane y M M Sternheim, John Wiley & Sons, 1980.

Práctica 4

Capacidad Térmica Específica y Entalpía de Vaporización del Agua

OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

El alumno:

1. Establecerá el valor medio y la incertidumbre correspondiente de la capacidad térmica específica del agua.
2. Establecerá el valor medio y la incertidumbre correspondiente de la entalpía de vaporización (calor latente de vaporización*) del agua en las condiciones de la ciudad universitaria.

ANTECEDENTES

Se llama calor a la transmisión energética que se establece entre dos sistemas con temperaturas originalmente distintas, cuando se ponen en contacto a través de una frontera diatérmica.

En ciertas circunstancias, se puede saber que un sistema participa en una transmisión de calor porque su temperatura varía (si la temperatura aumenta, el sistema recibe calor. Si la temperatura disminuye, el sistema cede calor).

En este caso se puede apreciar que la transmisión de calor tiene un efecto palpable en las propiedades del sistema. Debido a lo anterior, esta transmisión de energía se llama calor sensible.

Se puede cuantificar la transmisión de calor sensible al observar que, para una masa dada, el cambio en el valor de la temperatura de un sistema es proporcional al calor que se transmite:

$$Q \propto \Delta T$$

Similarmente, es fácil comprobar que, para una diferencia de temperatura dada, la transmisión de calor es proporcional a la cantidad de masa del sistema:

$$Q \propto m$$

Si se combinan las propiedades anteriores:

$$Q \propto m \Delta T$$

Al eliminar la proporcionalidad mediante la introducción de una constante, C, resulta:

$$Q = C m \Delta T$$

Para una pequeña transmisión de calor (δQ) que provoca una pequeña diferencia de temperatura (dT) se tiene:

$$\delta Q = m C dT$$

(*) término utilizado por algunos autores aunque ya no se utiliza actualmente.

PRACTICA 5

ECUACION DE CLAUSIUS - CLAPEYRON

(Método alternativo para calcular la entalpía de vaporización)

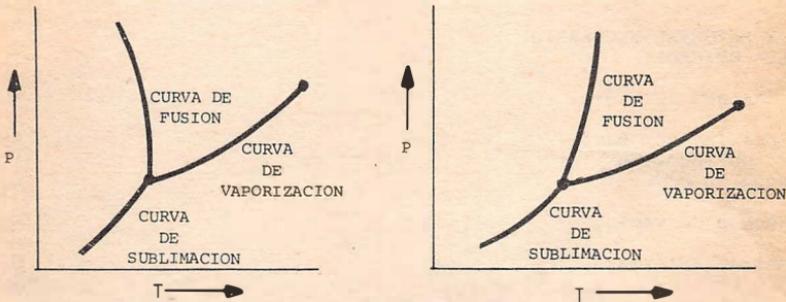
- OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

EL ALUMNO:

1. Calculará el valor de la entalpía de vaporización del agua mediante la ecuación de Clausius-Clapeyron.
2. Observará que la temperatura de ebullición varía conforme a la presión de saturación en una sustancia pura.

- ANTECEDENTES

Recordando que una sustancia pura es aquella que no cambia su composición química cuando cambia de fase, se puede observar un comportamiento diferente del agua, con la mayoría de las sustancias puras, cuando éstas se funden o se congelan.



Agua

La mayoría de las sustancias puras

Figura 1

En las figuras se observa que las líneas que separan a las distintas fases tienen cierta inclinación. Las que separan al sólido del gas y al líquido del gas, tienen una pendiente positiva, mientras que la que separa al sólido del líquido puede ser positiva (para la mayoría de las sustancias) o negativa (para el agua y algunas otras pocas sustancias).

Un análisis debido a Emile Clapeyron* indica que la inclinación de la frontera entre el sólido y el líquido está definida según:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{h_{if}}{v_{if}T} \quad (1)$$

(*) Emile Clapeyron (1799-1864) fue un ingeniero y físico francés que entre sus trabajos publicó una memoria sobre "La Fuerza Motriz del Calor" lo cual contribuyó a la fundación de la Termodinámica.

tiene validez general para cualquier cambio de fase que ocurre a presión y a temperatura constantes.

Nótese que la ecuación de Clapeyron permite el cálculo de la entalpía de transformación en los cambios de fase, partiendo exclusivamente de datos P , v , T .

Otro análisis parecido pero, éste debido a Emile Clapeyron y a Rudolf Clausius* señala que la inclinación de la frontera entre el sólido y el gas y aquella entre el líquido y el gas está definida según:

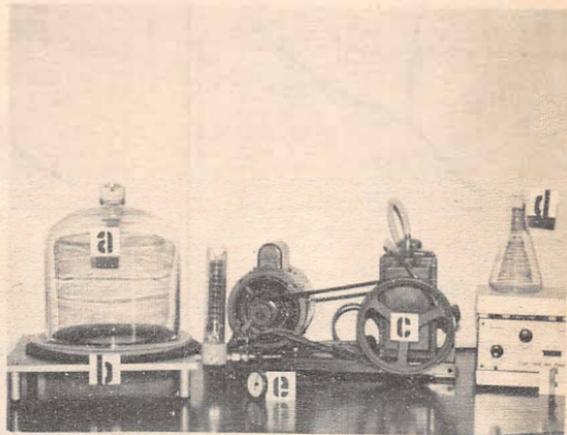
$$\frac{dP}{dT} = \frac{h_{if}}{R} \frac{P}{T^2} \quad (\text{a presiones medianas o pequeñas}) \quad (2)$$

La última ecuación significa que, si se miden valores de las temperaturas de saturación y los valores correspondientes de las presiones de saturación, se puede conocer el valor de la entalpía de cambio de fase ya que la constante particular de cada sustancia es una propiedad que se conoce.

En esta práctica se pretende señalar un procedimiento adecuado para medir las propiedades, presión y temperatura en la zona de saturación del líquido y del gas y a su vez conocer el valor de la entalpía de vaporización.

**EQUIPO Y MATERIAL NECESARIO
PARA CADA BRIGADA:**

- a) Una campana de vacío.
- b) Una platina con barómetro de mercurio y empaque de goma.
- c) Una bomba de vacío.
- d) Un matraz Erlenmayer de 500 cm^3 con oliva lateral.
- e) Un termómetro bimetalico de -50 a 50°C .
- f) Una parrilla eléctrica de temperatura controlada.



(*) Emanuel Rudolf Clausius, físico alemán (Koslin, Pomerania 1822 - Bonn 1888) fue profesor en Zurich, Witzburg y Bonn, estudió la teoría matemática de la Electricidad, después orientó sus investigaciones hacia la termodinámica. En 1850 introdujo el término ENTROPIA para dar un sentido más general a la 2da. Ley de la Termodinámica.

- DESARROLLO

El profesor señalará el método adecuado para medir con precisión las presiones y las temperaturas de saturación, asimismo la forma de calcular la entalpía de vaporización.

- DISCUSION

La ecuación 2 se puede integrar definida o indefinidamente. ¿Cuál es más conveniente para calcular la entalpía de vaporización?

¿Qué clase de curva resulta de graficar el $\ln P$ (ordenada) contra $(1/T)$ (abscisa)?

¿Cuál es el mejor valor de h_{fg} que se puede obtener a partir de los datos que se toman en esta práctica? Indique la técnica que le permite encontrar el "mejor valor".

¿Qué método es más confiable para estimar el valor de h_{fg} ? ¿El de la práctica presente o el calorimétrico? Calcule:

$$\frac{h_{fg}(\text{práct}) - h_{fg}(\text{tablas})}{h_{fg}(\text{tablas})} \times 100$$

para ambos casos justifique así su respuesta.

- APLICACIONES

Verifique que la integral indefinida de la ecuación 2 es de una forma muy parecida a la ecuación de Antoine:

$$\ln P = Y - \frac{X}{T+Z}$$

donde X, Y y Z son constantes.

Calcule la temperatura a la que se evaporan (en el D.F.)

a) El gas doméstico (n - butano)

b) La gasolina (isopentano)

Use para ello la forma de la ecuación de Antoine (y las constantes que se ofrecen en "Ingeniería Termodinámica", de Balzhiser, R. E., y Samuels, M. R., Ed. Prentice - Hall, pag. 578.

En la figura 1 se observa que la línea que separa al líquido del sólido, en el caso del agua, tiene una pendiente negativa. ¿Cómo emplearía usted este hecho para explicar que el hielo flota en agua líquida? Sugerencia: examine cuidadosamente la ecuación 1.

Un hombre de 80 kg tiene unos patines para hielo cuyas hojas tienen 20 mm^2 en contacto con el hielo. Si el clima está a -2°C , ¿se fundirá el hielo bajo los patines? ¿Cuál es la temperatura mínima a la que puede patinar esta persona?

Se sabe que a 273.16 K la presión de saturación es 0.6113 kPa. A estas condiciones:

$$h_{if} = 333.41 \text{ J/g}$$

y

$$v_{if} = -9.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$$

Considere estos últimos valores como constantes.

P R A C T I C A 6

CONSTANTE PARTICULAR (R) Y COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD ISOTERMICO (β_T)
DEL AIRE.

- OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

EL ALUMNO:

1. Tomará un criterio para clasificar el comportamiento de un gas como real o como ideal.
2. Determinará el valor de la constante particular del aire.
3. Medirá el coeficiente de compresibilidad isotérmico del aire a las condiciones del laboratorio.

- ANTECEDENTES

Robert Boyle (en 1662) y Edmond Mariotte (en 1676) descubrieron que cuando una masa dada de un gas se sometía a diferentes presiones a condiciones de temperatura constante, el volumen variaba proporcionalmente al inverso de la presión: $v \propto 1/p$ o bien

$v = C_T \left(\frac{1}{P}\right)$. Para dos estados a la misma temperatura resulta que $P_1 v_1 = P_2 v_2$ (1)

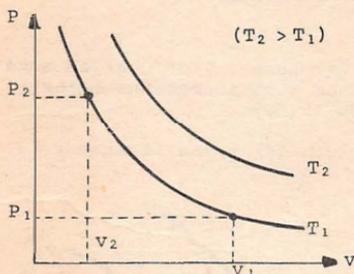


Fig. 1

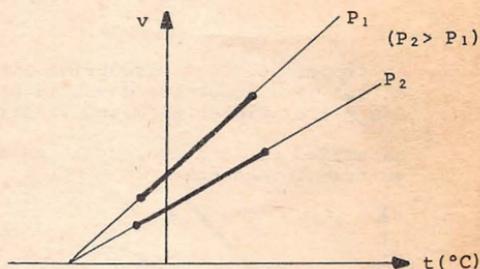


Fig. 2

La ecuación de una isoterma es una hipérbola en el plano (v,P) (Fig.1)

Algunos años más tarde, Jacques Charles (en 1787) y Louis-Joseph Gay-Lussac (en 1802) hallaron que el comportamiento de los gases a presión constante era tal, que el volumen aumentaba en la misma fracción del volumen a 0(°C) por cada grado centígrado de aumento en la temperatura; es decir, en un plano (t, v) (fig. 2) una isóbara es una línea recta con una ecuación

$$v = v_0 (1 + \alpha t) \quad (2)$$

Los mismos científicos encontraron un comportamiento similar cuando el volumen se mantenía constante. En este caso, la presión absoluta aumentaba en la misma fracción que el valor a $0(^{\circ}\text{C})$ en cada grado de aumento en la temperatura. En consecuencia, en un plano (t, P) las isócoras son líneas rectas con una ecuación $P = P_0(1 + \beta t)$ (3)

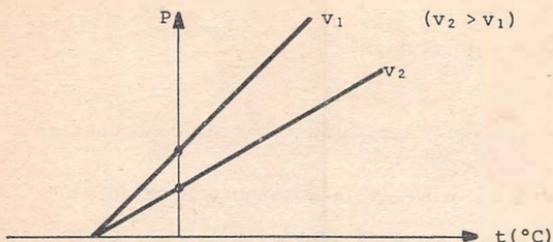


Fig. 3

Las ecuaciones (2) y (3) se pueden simplificar si, mediante una traslación adecuada de ejes, se transforman en rectas que pasan por el origen.

La nueva abscisa, T , se relaciona con la primitiva según

$$T = \frac{1}{\alpha} + t \quad (\text{en el caso isobárico})$$

$$T = \frac{1}{\beta} + t \quad (\text{en el caso isométrico})$$

La importancia del descubrimiento de Gay-Lussac y de Charles está en que para todos los gases (a presiones suficientemente bajas) $1/\alpha$ y $1/\beta$ tienen el mismo valor: $273.15(^{\circ}\text{C})$.

La unidad en la nueva escala es el kelvin (K) y las figuras 2 y 3 se transforman en:

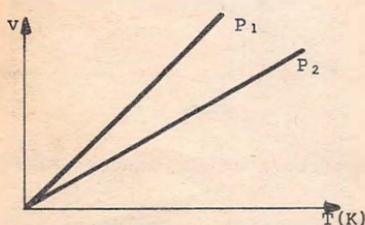


Fig. 4

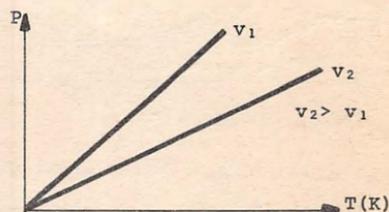


Fig. 5

Las ecuaciones (2) y (3) se transforman en:

$$v = C_{\pi} T \quad (4)$$

y en

$$P = C_{\nu} T \quad (5)$$

A las ecuaciones 1 y 4 ó 5 se les llama respectivamente la ley de Boyle y Mariotte y la ley de Gay-Lussac y Charles.

Cuando se estudian las transformaciones isotérmicas, isobáricas e isométricas se puede tener una situación como la de la figura 6.

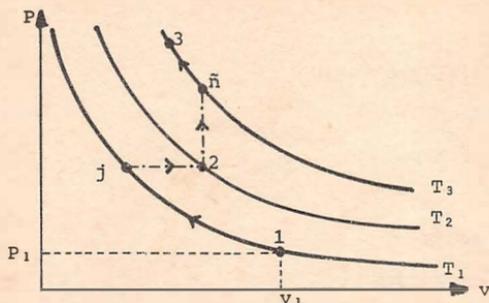


Fig. 6

Los estados 1 y j tienen la misma temperatura, los estados j y 2 tienen la misma presión, los estados 2 y \bar{n} tienen el mismo volumen y los estados \bar{n} y 3 tienen la misma temperatura. Por lo tanto, al aplicar las leyes de Boyle y Mariotte, de Gay Lussac y Charles, se tiene:

$$P_1 v_1 = P_2 v_j \quad \therefore \quad v_j = \frac{P_1 v_1}{P_2} \quad A$$

$$\frac{v_j}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} \quad \therefore \quad v_j = \frac{T_1}{T_2} v_2 \quad B$$

$$\frac{P_{\bar{n}}}{T_3} = \frac{P_2}{T_2} \quad \therefore \quad P_{\bar{n}} = P_2 \frac{T_3}{T_2} \quad D$$

$$P_{\bar{n}} v_2 = P_3 v_3 \quad \therefore \quad P_{\bar{n}} = \frac{v_3 P_3}{v_2} \quad E$$

De las ecuaciones A y B se tiene: $\frac{P_1 v_1}{P_2} = \frac{T_1 v_2}{T_2} \therefore \frac{P_1 v_1}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{T_2}$

de las ecuaciones D y E se tiene: $\frac{P_2 T_3}{T_2} = \frac{v_3 P_3}{v_2} \therefore \frac{P_3 v_3}{T_3} = \frac{P_2 v_2}{T_2}$

Finalmente $\frac{P_1 v_1}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{T_2} = \frac{P_3 v_3}{T_3} = \text{constante.}$

La constante no depende del estado del gas, sino únicamente de su naturaleza, y se llama la constante particular del gas.

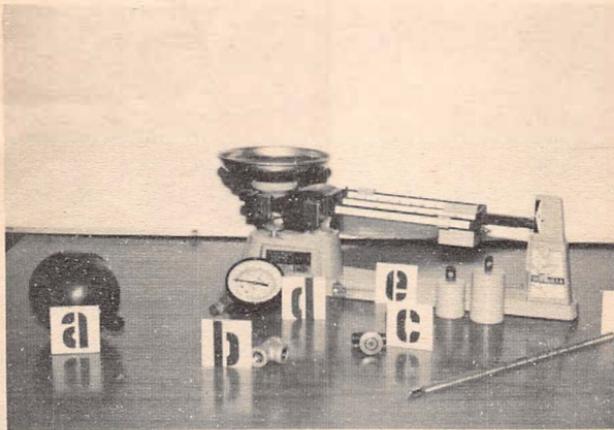
La ecuación que relaciona a las propiedades P , v y T se escribe entonces

$$P v = R T$$

Esta es la ecuación de Clapeyron, llamada la ecuación del gas ideal *

- EQUIPO Y MATERIAL NECESARIO
POR BRIGADA:
Para la actividad 1:

- a) 1 tanque de plástico de 500 cm³
- b) 1 conexión "T"
- c) 1 válvula de aguja
- d) 1 manómetro de Bourdon
- e) 1 balanza de 2610(g)
- f) 1 termómetro

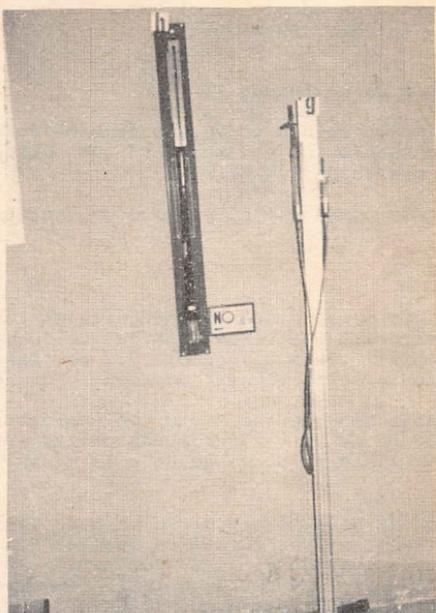


(*) Termodinámica Técnica de V.A. Kirillin, V.V. Shickev y A.E.S. Sheindilin, Ed. Mir.

Para la actividad 2:

- 26 -

- g) 1 aparato de Mariotte y Leblanc
- h) 1 barómetro (común para todas las brigadas)



- DESARROLLO:

Actividad 1. El profesor discutirá la técnica más adecuada, para determinar el valor de la constante particular del aire. (Se recomienda que se registre un mínimo de 6 valores).

Actividad 2. El profesor explicará el manejo del aparato de Mariotte y Leblanc que permite establecer el valor del coeficiente de compresibilidad isotérmico del aire a las condiciones del laboratorio.

- DISCUSION:

Con respecto a la actividad 1.

¿Podría establecer el valor deseado (R) con el gas en el tanque a P y T ambientes?

¿Por qué considera usted necesario esperar unos minutos, luego de introducir aire al tanque para tomar la lectura de la presión?

¿Es indispensable conocer la masa de aire que se encuentra en el tanque? ¿Por qué?

¿Es necesario conocer la presión barométrica en el laboratorio para realizar la práctica? ¿por qué?

En el laboratorio se cuenta con bombas de vacío. ¿Cómo se modificaría la técnica con el empleo de una bomba de vacío?

¿Esperaría usted un cambio en el valor de R cuando se cambie la Temperatura del gas? ¿Por qué?

Con respecto a la actividad 2:

En el experimento se han provocado cambios en presión (ΔP) que a su vez producen cambios en volumen (Δv) ¿Por qué puede usar $(\partial v / \partial P)$ en lugar de la expresión $(\Delta v / \Delta P)$?

¿Cómo garantiza usted que el proceso es isotérmico?

APLICACIONES:

- Procesos con gases donde la incógnita es la masa. Véase el ejemplo resuelto 1.3 de "Termodinámica" de John P. Holman, p. 22, - Mc. Graw-Hill. Véase el ejemplo 7.2 de "Ingeniería Termodinámica: Fundamentos y Aplicaciones" de Francis Huang, p. 171. C.E.C.S.A.

En una habitación de 7 m x 5 m con una altura de 3.1 m se tiene aire a 730 mm de Hg y 23°C. ¿Cuánto aire entrará del exterior si la presión llega a 760 mm de Hg a la misma temperatura?

- Cálculo de la masa molecular de un gas. Véase: Para las mezclas de gases ideales "Termodinámica Técnica" de Kirillin V. A.; Sichev, V.V. Sheindlin, A. E. Ed. Mir, p. 31, ec. 1.61. Véase el ejemplo 7.4 de "Ingeniería Termodinámica: Fundamentos y Aplicaciones" de F. Huang, p. 173 C.E.C.S.A. ¿Cuál es la masa molecular de una sustancia de la que se sabe que a 101.325 (kPa), 0(°C) y 71.1 (g) ocupan 22.414 (dm³)?
- Vea los valores de la constante universal de los gases en "Termodinámica" de K. Wark, p. 75, Mc. Graw-Hill o en "Ingeniería Termodinámica: Fundamentos y Aplicaciones" de F. Huang, p. 170, CECSA.

Se sabe que en 4 (dm³) se encuentran 7.49(g) de oxígeno a 150(°C) y 137.3 (kPa). ¿Cuántos átomos de oxígeno conforman la molécula del gas? ¿Cómo se llama a este gas?
- Vea la discusión acerca del coeficiente de compresibilidad isotérmica en "Thermofluid Mechanics" de Pefley y Murray, pp. 42 y 43, Mc. Graw-Hill.

PRACTICA 7

INDICE ADIABATICO Y CAPACIDADES TERMICAS ESPECIFICAS (Cp, Cv) A PRESION Y A VOLUMEN CONSTANTES DEL AIRE.

- OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

EL ALUMNO:

- 1.- Calculará el índice adiabático del aire (k) mediante el método de Clément y Désormes.
- 2.- Determinará las capacidades térmicas específicas a presión y volumen constantes (Cp, Cv) del aire.

- ANTECEDENTES

Cuando un gas perfecto experimenta un proceso adiabático ($Q = 0$) cuasi-estático o cuasi-equilibrio, la expresión de primera Ley de la Termodinámica para sistemas cerrados se reduce a

$$dU = \delta Q + \delta w \Rightarrow dU = \delta w$$

o bien

$$m C_v dT = - PdV \quad (a)$$

por otra parte, de la ecuación de estado:

$$d(pV) = d(mRT)$$

$$pdV + Vdp = m R dT \quad (b)$$

Despejando de (a) y (b) la diferencial de temperatura e igualando las respectivas expresiones:

$$-\frac{pdV}{m C_v} = \frac{pdV + Vdp}{m R}$$

y además recordando que $R = C_p - C_v$

$$(- pdV) (C_p - C_v) = C_v(pdV + Vdp)$$

$$C_p pdV + C_v Vdp = 0 \quad (c)$$

Ecuación diferencial de primer orden de variables separables.

Dividiendo (c) entre C_v , p y V queda:

$$\frac{C_p}{C_v} \frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = 0$$

Designando la razón de las capacidades caloríficas por la letra k .

$$k \frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = 0$$

Esta ecuación no puede integrarse mientras no se tenga información sobre el comportamiento de k .

*Se ha visto que para los gases monoatómicos k es constante, mientras que para los diatómicos y poliatómicos puede variar con la temperatura. Es necesario, sin embargo, un cambio muy grande de temperatura para producir una variación apreciable de k . Así, por ejemplo en el caso del monóxido de carbono, para un aumento de la temperatura desde 0°C hasta 2000°C se produce una disminución de k de 1.4 a 1.3.

Considerando pues, k constante e integrando la ecuación anterior se obtiene:

$$k \ln V + \ln P = \ln C$$

o bien, basándose en las propiedades de los logaritmos.

$$pV^k = \text{cte} \quad (d)$$

La ecuación (d) se cumple para todos los estados de equilibrio por los cuales pasa un gas perfecto durante un proceso adiabático cuasi-estático.

Como la ecuación de un proceso adiabático involucra al exponente "k", a este se le ha asignado el nombre de "Índice Adiabático".

Es importante darse cuenta que, una expansión libre es un proceso adiabático pero no cuasi-estático, sin embargo, los estados inicial y final de dicho proceso son estados de equilibrio y se puede suponer que esta expansión sea aproximadamente cuasi-estática.

El método de Clément y Désormes se basa en la suposición anterior, sin embargo pensamos que, el describirlo forma parte de la dinámica que el profesor del laboratorio empleará en este experimento, luego entonces no se menciona aquí; en su lugar, se enunciará un método alternativo para determinar las capacidades térmicas específicas C_p y C_v .

NOTA: Este método no es el que empleará en esta práctica, sin embargo el profesor puede optar por él si se tiene al alcance los dispositivos que se mencionan en el método.

Para medir C_v , el gas se halla encerrado en un recipiente de acero de paredes delgadas con un hilo de calefacción arrollado en él. Manteniendo una corriente eléctrica en el hilo se suministra al gas una cantidad de energía calorífica determinada y, se obtiene el calor específico a volumen constante por la elevación de su temperatura.

* Calor y Termodinámica, Zemansky. P. 127.

Se utiliza el mismo procedimiento para obtener C_p salvo que, en lugar de mantener al gas a $v = cte$ se le permite circular a presión constante a través del calorímetro. A partir de las temperaturas inicial (entrada) y final (salida), del ritmo de suministro de calor, y del gasto del gas se calcula C_p .

*Conclusiones de los experimentos efectuados al determinar C_v y C_p .

. Para todos los gases:

C_v es función solamente de T .

C_p es función solamente de T , y mayor que C_v .

$C_p - C_v = \text{constante} = R$

$k = C_p/C_v = \text{función solamente de } T, \text{ y mayor que la unidad.}$

. Para gases monoatómicos, tales como He, Ne, Ar y la mayor parte de los vapores metálicos, como los de Na, Cd y Hg:

C_v es constante en un amplio intervalo de temperatura y aproximadamente igual a $3R/2$.

C_p es constante en un amplio intervalo de temperaturas e igual, muy aproximadamente a $5R/2$.

k es constante para un amplio intervalo de temperaturas e igual, muy aproximadamente a $5/3$.

. Gases diatómicos denominados permanentes, a saber, H_2 , D_2 , O_2 , N_2 , NO y CO:

C_v es constante a las temperaturas ordinarias; es igual aproximadamente a $5R/2$ y aumenta al elevar la temperatura.

C_p es constante a las temperaturas ordinarias; es igual aproximadamente, a $7R/2$ y aumenta al elevar la temperatura.

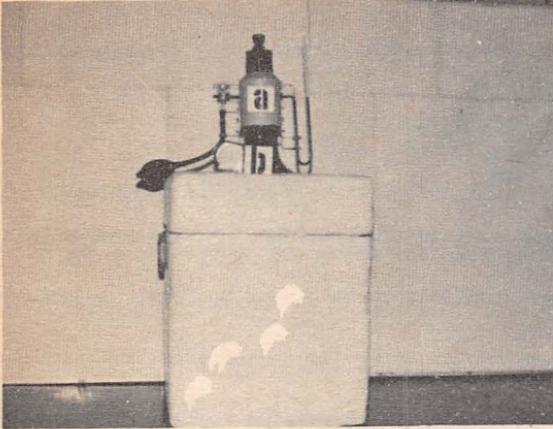
k es constante a las temperaturas ordinarias e igual, aproximadamente, a $7/5$, disminuyendo al elevar la temperatura.

. Gases poliatómicos y gases que son químicamente activos, tales como CO_2 , NH_3 , CH_4 , Cl_2 y Br_2 .

C_p , C_v y C_p/C_v varían con la temperatura, siendo diferente la variación para cada gas.

- EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO POR BRIGADA

Aparato de Clément y Désormes



- DESARROLLO

Actividad 1. Se expondrán las consideraciones teóricas en las que se basa el método de Clément y Désormes para determinar el índice adiabático de los gases (en este caso, el del aire).

Actividad 2. A partir de las relaciones $R = C_p - C_v$, $k = C_p/C_v$ y de los resultados de la práctica donde se obtuvo el valor de R , se calcularán las capacidades térmicas específicas a presión y a volumen constantes del aire.

- DISCUSION

Respecto a la actividad 1:

¿Cuántos y cuáles son los procesos que suceden en el método de Clément y Désormes?

¿Cuántos estados de equilibrio existen en tal método?

Escriba el desarrollo matemático empleado en el método.

Respecto a la actividad 2.

¿Cuál es el valor de R_{aire} (calculado en la práctica correspondiente) y sus unidades respectivas?

¿Cuál es el valor de k_{aire} que se ha determinado en este experimento?

¿Cuáles son los valores de R y k del aire que aparecen en los textos apropiados al tema? Si hay diferencias entre los determinados experimentalmente y los que reportan los textos ¿a qué cree que se deba?

¿Cuáles son las unidades de C_p , C_v , R , \hat{C}_p , \hat{C}_v , \bar{R} y k ?

Las relaciones $R = C_p - C_v$ y $k = C_p/C_v$, también se emplean para $\bar{R} = \hat{C}_p - \hat{C}_v$ y $k = \hat{C}_p/\hat{C}_v$.

¿Por qué es incorrecto usar las unidades $\frac{J}{\text{gmol}\cdot K}$ en lugar de $\frac{J}{\text{mol}\cdot K}$

o bien $\frac{k J}{\text{kgmol}\cdot K}$ en lugar de $\frac{k J}{\text{kmol}\cdot K}$?

- APLICACIONES

Velocidad de una onda longitudinal, véase "Calor y Termodinámica" de Mark W. Zemansky, P. 135-140.

¿Cómo interviene k en la medición de la velocidad del sonido?

Si la masa molecular del aire (M) es de 28.8 g/mol, $k = 1.4$ y $T = 20^\circ\text{C} = 293.15\text{K}$.

¿Cuál será la velocidad del sonido en el aire en estas condiciones?

Calores específicos o capacidades térmicas específicas como función de la temperatura, ver "Fundamentals of Classical Thermodynamics SI Version 2e. p. 105 y 683-684.

¿Cuál es el calor específico a volumen constante del monóxido de carbono a 2000K, y qué error máximo involucraría este valor?

PRACTICA 8

COEFICIENTE DE JOULE - THOMPSON

(Calorímetro de Estrangulamiento)

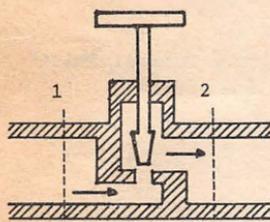
OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

EL ALUMNO:

1. Conocerá la utilidad práctica de un estrangulamiento isentálpico para calcular la calidad de un vapor (calorímetro de estrangulamiento).
2. Aplicará sus conocimientos en el uso y manejo de tablas y diagramas de propiedades de las sustancias.

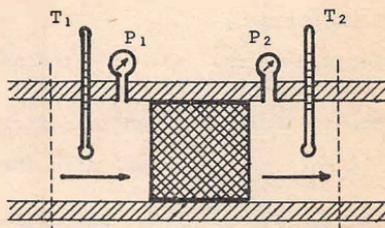
ANTECEDENTES

Considérese un fluido que circula por un conducto que contiene alguna obstrucción, ésta puede ser un tapón poroso o bien una válvula de aguja que, en ambos casos estrangula al fluido (en los experimentos originales de Joule y Kelvin se utilizó un tapón de algodón y el gas fluía a través de él. En los experimentos modernos, se utiliza una copa hecha de un material poroso, resistente, que es capaz de soportar grandes presiones y que hace que el gas circule a través de ella en dirección radial).



válvula de aguja

aislamiento
térmico



tapón poroso

Haciendo un balance de energía entre las secciones 1 y 2

$$\dot{Q} + \dot{W} = \dot{m} \left[\frac{1}{2} (\bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2) + g(z_2 - z_1) + u_2 - u_1 + P_2 v_2 - P_1 v_1 \right]$$

$$\dot{Q} = \dot{W} = 0 \quad ; \quad \bar{V}_2 \doteq \bar{V}_1 \quad ; \quad z_2 = z_1$$

y como se detecta con los instrumentos de medición instalados que:

$$P_1 > P_2 \quad \text{y} \quad T_1 \neq T_2 \quad \text{o} \quad T_1 = T_2$$

$$u_2 \neq u_1 \quad \text{y} \quad P_2 v_2 \neq P_1 v_1$$

$$0 = u_2 - u_1 + P_2 v_2 - P_1 v_1$$

reordenando términos

$$0 = (u_2 + P_2 v_2) - (u_1 + P_1 v_1)$$

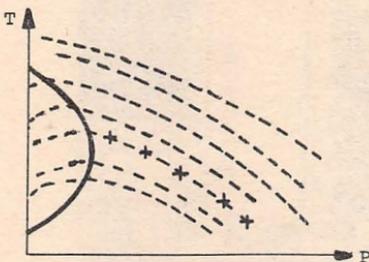
$$0 = h_2 - h_1$$

$$\therefore h_1 = h_2$$

Luego entonces, se dice que un proceso en el que las entalpías antes y después de la obstrucción son iguales, se denomina ESTRANGULAMIENTO.

Bien, la forma en que se puede recoger información del experimento y así, interpretar los resultados convenientemente, es la siguiente:

Se miden P_1 y T_1 , se busca que exista una disminución de la presión de modo que haya un valor fijo de P_2 y se mide T_2 . Manteniendo constantes P_1 y T_1 , se varía P_2 y se mide el valor correspondiente de T_2 , lo que se repite para varios valores de P_2 , luego, se puede variar P_1 y T_1 y se repite nuevamente toda la secuencia antes descrita, de esta manera se obtienen una serie de puntos sobre un diagrama P-T (ver diagrama).



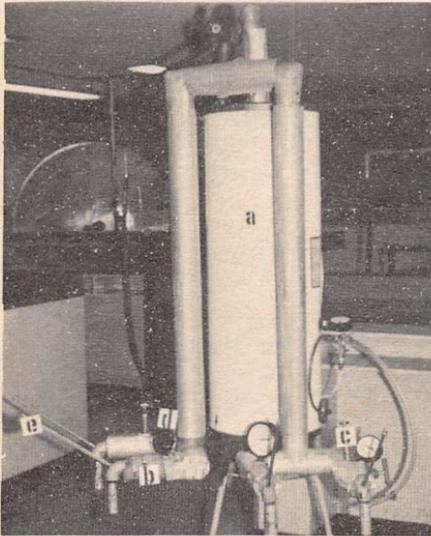
De la figura se observa que:

1. Se han generado líneas de entalpía constante (isentalpicas)
2. El efecto de Joule-Thomson a la izquierda de la línea continua (a la izquierda de la línea de inversión) ocasiona un enfriamiento del gas ($\partial T/\partial P > 0$) y a la derecha de dicha línea, ocasiona un calentamiento ($\partial T/\partial P < 0$).
3. Existe un punto en el cual $\partial T/\partial P = 0$ y es el punto de $T_{\text{máx}}$.
4. Si unimos todos los puntos de $T_{\text{máx}}$, generamos la línea de inversión la cual separa las pendientes positivas (de las líneas isentalpicas) y las negativas.

Este fenómeno que se ha descrito se utiliza para diversos fines, uno de ellos, para determinar la calidad de un vapor en el interior de la caldera (propósito de esta práctica) y el dispositivo empleado se llama calorímetro de estrangulamiento.

- EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO POR CADA BRIGADA

- a) 1 Calentador de gas adaptado para generar vapor de agua.
- b) 4 Válvula de aguja
- c) 4 Termómetros bimetalicos
- d) 1 Manómetros Bourdon
- e) 4 Termómetro de mercurio de -10 a 110°C con estuche metálico.



DESARROLLO

Actividad 1. El profesor verificará que los alumnos conozcan las líneas isentálpicas, isobáricas, isotermas e isócoras de una sustancia pura en un diagrama de Molliere (s-h) y en uno de s-T.

Actividad 2. El profesor explicará que partes constituyen al generador de vapor del laboratorio y hará saber a sus alumnos que precauciones deberán tener al tomar sus lecturas.

Actividad 3. Los alumnos observarán un proceso de estrangulamiento e identificarán mediante el uso de tablas o diagramas, las propiedades del vapor de agua antes y después del estrangulamiento.

- DISCUSION:

Respecto a la actividad 1:

¿En un diagrama s-h para una sustancia pura, la curva de saturación tiene la misma forma que en un s-T y que en un v-P?

¿En dónde son paralelas los isóbaras con las isotermas?

¿Puede dibujar cualitativamente isócoras, isóbaras, isotermas e isentálpicas en los diagramas s-h y s-T?

Respecto a la actividad 2:

¿Se pueden identificar las partes que tiene el generador de vapor?

¿Qué función tiene cada una de esas partes?

¿Porqué se aíslan los tubos mediante los cuales se hacen extracciones de vapor?

¿Por qué debe ir el termómetro de mercurio en un estuche metálico?

Respecto a la actividad 3:

¿Corresponde la temperatura de saturación a la presión de saturación que marca el generador de vapor? ¿A qué se debe esta situación? ¿Qué dato se debe tomar en cuenta para tomar las lecturas, P_{sat} o T_{sat} ?

¿Se puede dibujar el proceso de estrangulamiento en los diagramas s-h y s-T? si es así trázcelo.

¿Qué calidad tiene el vapor dentro del generador?

NOTA: Si todas estas interrogantes no se pueden aclarar en el transcurso de la práctica, se deben escoger las que se consideren de mayor relevancia.

APLICACIONES

Licuefacción de gases por el efecto Joule-Kelvin véase Calor y Termodinámica de Mark W. Zemansky p. 345-353 Aguilar S.A. de ediciones 4a. ed. 1979.

Licuefacción y solidificación de gases véase Termodinámica de Wark Kenneth edit. Mc. Graw-Hill, primera edición en español 1985. p. 728-732.

Efecto de la válvula de expansión o tubo capilar en un ciclo de refrigeración por compresión de vapor.

Véase Fundamentos de Termodinámica de G. J. Van Wylen y Richard E. Sonntag.

Edit. Limusa México 1977, p. 164 y 165, ejemplos 5.13 y 5.14.

PRACTICA 9
 SISTEMAS ABIERTOS
 (VENTURI Y BOMBA DE AGUA)

• OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

EL ALUMNO:

1. Identificará dos sistemas abiertos o volúmenes de control en la instalación hidráulica propuesta.
2. Aplicará la ecuación de continuidad y la expresión de la Primera Ley de la Termodinámica para sistemas abiertos bajo régimen estable en el cálculo del gasto hidráulico.
3. Calculará la potencia de la bomba del sistema hidráulico propuesto.

• ANTECEDENTES

La tobera y el Venturi¹. Siempre que un fluido en flujo estable experimenta un cambio en la presión, también experimentará un cambio correspondiente en la velocidad.

Considérese el paso de un fluido por una tobera desde un depósito de gran tamaño hasta una región de baja presión. Puede aplicársele a este proceso un balance de energía despreciando los cambios en energía potencial.

$$\dot{Q} + \dot{W} = \dot{m} \left[\frac{1}{2} (\bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2) + h_2 - h_1 \right] \quad (a)$$

Como \dot{Q} y \dot{W} son igual a cero y se considera que la velocidad en el depósito es prácticamente cero ($\bar{V}_1 = 0$)

$$0 = \dot{m} \left[\frac{1}{2} \bar{V}_2^2 + h_2 - h_1 \right]$$

$$\bar{V}_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)} \quad \left(\frac{J}{kg} = \frac{N \cdot m}{kg} = \frac{kg \cdot m^2}{s^2 \cdot kg} = \frac{m^2}{s^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

¹ Tomado de Motores de Combustión Interna Análisis y Aplicaciones Edward F. Obert, CECSA, México, 1974. P. 104 - 108.

Consideremos 2 casos:

- 1o. Si el fluido es un líquido, más concretamente agua, habrá que tomar las consideraciones del caso.

$$h_1 - h_2 = u_1 - u_2 + P_1 v_1 - P_2 v_2 \quad (b)$$

como el cambio en la energía interna es muy pequeña en comparación con el término de trabajo de flujo.

$$h_1 - h_2 = P_1 v_1 - P_2 v_2$$

Además, el volumen específico permanece inalterable

$$\bar{v}_2 = \sqrt{2 v(P_1 - P_2)} = \frac{\sqrt{2(P_1 - P_2)}}{\rho} \quad (c)$$

A partir de la ecuación (c) y midiendo la diferencia de presiones entre los puntos donde se estableció el balance de energía, se puede calcular la velocidad del fluido y consecuentemente el gasto de agua.

- 2o. Si el fluido es un gas con el comportamiento parecido al gas perfecto, se puede hacer los siguientes arreglos a la ecuación (a).

$$h_1 - h_2 = C_p(T_1 - T_2) = C_p T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$$

como se trata de un proceso adiabático $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$

$$\bar{v}_2 = \sqrt{2 C_p T_1 \left(1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)} \quad (d)$$

de acuerdo con la ecuación de continuidad

$$\dot{m} = \frac{A_2 \bar{v}_2}{v_2} \Rightarrow A_2 = \frac{\dot{m} v_2}{\bar{v}_2} \quad (e)$$

y

$$P_1 v_1^k = P_2 v_2^k \quad \text{para un proceso adiabático} \quad (f)$$

Asignando a P_1 un valor constante y a P_2 valores progresivamente menores se determina la velocidad y el área para cada valor de P_2 . Sin embargo, se encontrará que al aumentar \bar{V}_2 continuamente, A_2 disminuirá, primero hasta un valor mínimo para aumentar después progresivamente a medida que la presión del escape es cada vez menor; esto se puede observar de la ecuación (d) ya que un aumento de \bar{V}_2 tiende a disminuir el área (A_2) y un aumento en el volumen específico (v) tiende a aumentarla. Por lo tanto, disminuyendo la presión del escape, disminuye el área porque \bar{V}_2 aumenta en mayor proporción que v_2 pero, por debajo de cierta presión crítica se invierte este hecho (porque ahora v_2 aumenta más rápido que \bar{V}_2).

La condición de área mínima es que la presión P_2 o la relación de presiones P_2/P_1 permita a \bar{V}_2/v_2 alcanzar un valor máximo, así que sustituyendo la ecuación (d) en la ecuación (e).

$$\frac{\bar{V}_2}{v_2} = \frac{\dot{m}}{A_2} = \sqrt{\frac{2 C_p T_1}{v_2^2} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

y de la ecuación (f)

$$v_2 = v_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{-\frac{1}{k}} ; \quad v_2^2 = v_1^2 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{-\frac{2}{k}}$$

sustituyendo esta expresión en la ecuación anterior

$$\frac{\bar{V}_2}{v_2} = \sqrt{\frac{2 C_p T_1}{v_1^2} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

$$\frac{\bar{V}_2}{v_2} = \sqrt{\frac{2 C_p T_1}{v_1^2} \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (g)$$

Ahora diferenciándola con respecto a $\frac{P_2}{P_1}$ e igualándola a cero para encontrar un valor máximo.

$$r_p = \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (h)$$

La ecuación (h) permite calcular la presión crítica en la garganta de la tobera. Nótese que para las presiones de escape arriba de la presión crítica sólo se requiere una tobera convergente, pero si la presión del escape está por debajo de la presión crítica, la tobera tiene primero a convergir hacia un área mínima de garganta y después diverge. En este último caso se requiere de una tobera convergente-divergente si la expansión ha de ser reversible.

Si se sustituye la ecuación (h) en la ecuación (d) se obtiene la velocidad en la garganta de una tobera reversible.

$$V_2 = \sqrt{2 C_p T_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{2 C_p T_1 \left\{ 1 - \left[\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \right]^{\frac{k-1}{k}} \right\}}$$

$$V_2 = \sqrt{2 C_p T_1 \left(1 - \frac{2}{k+1} \right)} \quad (i)$$

como

$$R = C_p - C_v \quad \text{y} \quad k = C_p/C_v$$

$$R = C_p - \frac{C_p}{k} = C_p \left(1 - \frac{1}{k} \right) = C_p \left(\frac{k-1}{k} \right)$$

$$C_p = \frac{R k}{k-1} \quad (j)$$

además, recordando la relación entre presiones y temperaturas para un proceso adiabático.

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1-k}{k}} \quad \text{y sustituyendo aquí la ecuación (h)}$$

$$T_1 = T_2 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1-k}{k}} = T_2 \left[\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \right]^{\frac{1-k}{k}} = T_2 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{-1}$$

$$T_1 = \frac{T_2 (k+1)}{2} \quad (k)$$

sustituyendo las ecuaciones (j) y (k) en (i)

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 R K T_2 (k+1)}{k-1} \left[\frac{k+1-2}{k+1} \right]} = \sqrt{R K T_2 \frac{k+1}{k-1} \left[\frac{k-1}{k+1} \right]}$$

$$V_2 = \sqrt{R K T_2} \tag{1}$$

o bien

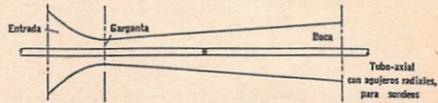
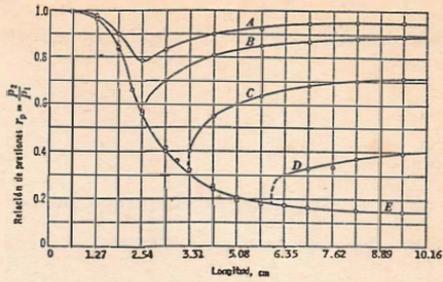
$$V_2 = \sqrt{K P_2 v_2} \tag{1'}$$

siendo ésta la velocidad del sonido. Antes de la garganta las velocidades son subsónicas y después de ella son supersónicas, siendo la presión de escape inferior a la presión crítica.

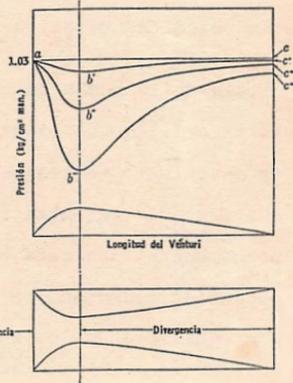
Si la presión en el escape se eleva gradualmente, el fluido persistirá en expansionarse, sin embargo en cierta etapa ocurrirá un impacto de compresión cuando la velocidad supersónica del fluido golpee al fluido más denso; en este caso decrece la velocidad abruptamente y el fluido es comprimido incrementándose la presión. Después del impacto la sección divergente actúa como un difusor, el cual tiene características opuestas a una tobera; disminuye la velocidad del fluido con el correspondiente aumento de la presión.

Si la presión se eleva hasta un valor próximo a la presión inicial, la tobera es llamada más propiamente VENTURI.

En el venturi la presión disminuye mientras que aumenta la velocidad en la sección convergente, después de ella, la velocidad disminuye en tanto que la presión aumenta en la sección divergente. (véanse figuras de tobera y venturi).



Variaciones de las condiciones de presión en una tobera convergente-divergente



Acción del venturi en un carburador

Con lo que respecta a las bombas, éste es un tema demasiado amplio para poder ser esbozado aquí; por tal motivo comentaremos un tópico muy aislado.

Bombas Centrifugas².

Estas máquinas, para el trasiego de líquidos se basan en los mismos principios que los ventiladores centrifugos utilizados para mover masas de aire y otros gases, su funcionamiento sigue las mismas leyes generales.

Las bombas centrifugas son máquinas de velocidad relativamente elevada y generalmente van acopladas directamente a una turbina, un motor eléctrico o a motores de explosión. El agua entra en el impulsor por su centro, fluye radialmente y abandona la periferia del impulsor a una velocidad que es la resultante de la velocidad periférica del álabe del impulsor y de la velocidad relativa del líquido.

En la envolvente o carcasa de la bomba en cuyo interior gira el rodetete impulsor, la velocidad del líquido (agua) va decreciendo gradualmente y, la energía de movimiento se transforma en energía de presión. El fluido que se bombea vence la resistencia que encuentra a su paso. La forma dada a una bomba centrifuga está encaminada a convertir la energía cinética en potencial reduciendo a un mínimo la fricción de rotación del impulsor y equilibrando los empujes laterales desarrollados en el eje.

Las bombas centrifugas pueden agruparse desde el punto de vista comercial como sigue: *de espiral, de turbina (difusor) y de flujo axial;*

²Tomado de: Energía Mediante Vapor, Aire o Gas de W. H. Severns, H.E. Degler y J. C. Miles, Edit. Reverté, S.A. España, 1972. P. 236, 237 345 y 346.

ahora, por el número de escalonamientos: de aspiración simple, de doble aspiración, de impulsor abierto, de impulsor cerrado, horizontales y verticales.

Algunos términos utilizados en estos tópicos son los siguientes:

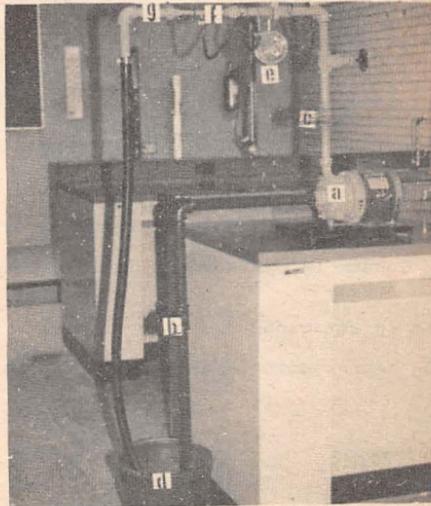
- Altura de aspiración.- Es la distancia vertical entre el nivel del agua que se ha de bombear y el nivel medio de la bomba.
- Altura de descarga.- Es la distancia vertical entre el nivel medio de la bomba y el nivel (o su equivalente) al cual se eleva el agua.
- Pérdidas por fricción.- Las pérdidas por rozamientos son obstrucciones que hay que vencer a expensas de la potencia aplicada a la bomba y se pueden determinar mediante manuales en los cuales, se indican las pérdidas por fricción correspondiente a tuberías, accesorios y válvulas. Estas pérdidas son forzosamente aproximadas y dependen del estado de la tubería (rugosidad), fluido manipulado, duración del período de servicio, tipo de válvulas y radio de las curvas.

- EQUIPO EMPLEADO POR CADA BRIGADA:

Una instalación como la que se muestra a continuación y que consta

de:

- a) 1 Bomba centrífuga 1/4 hp
- b) 1 Vacuómetro de Bourdon
- c) 1 Manómetro de Bourdon
- d) 1 Recipiente para succión y descargar el agua.
- e) 1 Manómetro diferencial de Bourdon o de mercurio.
- f) 1 Venturi
- g) Tubería galvanizada (19mm) y accesorios.



DESARROLLO

- Actividad 1. Los alumnos propondrán una secuencia de actividades (mediciones y cálculos) para lograr los objetivos 2 y 3 enunciados al principio de esta práctica. Para tal acción, deberán identificar los sistemas que permitirán hacer los balances de energía necesarios.
- Actividad 2. El profesor hará alusión a los antecedentes vistos en esta misma práctica y de acuerdo con sus alumnos, propondrá una dinámica en el grupo para efectuar las mediciones necesarias y calcular el gasto (\dot{m}) que maneja la bomba.
- Actividad 3. De forma análoga a la actividad 2, se propondrá la dinámica para obtener la potencia de la bomba.

DISCUSION

Respecto a la actividad 1.

De acuerdo a la ecuación de continuidad ¿qué datos se necesitan para calcular el gasto? ¿cuántas incógnitas aparecen en tal expresión? ¿cuál es el sistema Termodinámico que Ud. elegiría para hacer el balance de energía? ¿Qué sistema será el adecuado para calcular la potencia de la bomba?

Respecto a la actividad 2.

¿Cómo quedará un análisis de unidades en el sistema inglés para la ecuación (c)?

¿Cómo podrá conocer Ud. el área interior de la tubería? ¿Qué forma alternativa conoce Ud. para medir la velocidad de un fluido?

Respecto a la actividad 3.

¿Puede Ud. restar directamente las presiones de succión y descarga? ¿por qué?

¿Se puede aplicar en este sistema la ecuación de Bernoulli? ¿por qué?
¿Corresponden los cálculos a los datos de placa del motor de la bomba?

¿De qué datos se vale Ud. para elegir la potencia de una bomba? Describa brevemente las partes que constituyen una bomba centrífuga y qué función desempeña cada una de éstas.

- APLICACIONES

. Para calcular velocidades en los ductos, se usa un tubo llamado de PITOT, vea de que forma esta construido y en qué condiciones se puede utilizar.

Energía mediante, vapor, aire o gas de W. H. Severns, H. E. Degler y J. C. Miles Edit. Reverté, España, 1972. pp. 222 - 225.

. Tipos de bombas, la bomba centrífuga (de turbina o de difusión y de voluta), bombas axiales.

Rendimiento y eficiencia de las bombas

Conversión de energía. TURBOMAQUINARIA volumen 3

J. Kadambi Manohar Prasad Ed. Limusa. pp. 247 - 260

. Diseño, aplicación, especificaciones, operación y mantenimiento de bombas.

Manual de Ingeniería de Bombas

Igor J. Karassik, William C. Kantzoch, Warren H. Frasser, Joseph P. Mesino, Edit. Mc. Graw Hill.

Contiene: Clasificación de las bombas, centrífugas, de desplazamiento, a chorro; materiales de construcción, motores para bom

bas, controles y válvulas, instrumentación para supervisión y monitoreo. Sistemas de bombeo. Selección y mantenimiento. Pruebas, apéndices y datos técnicos.

- . Mediciones de caudales de agua, se utiliza el Tubo de Venturi cuando se necesitan obtener resultados seguros y exactos.

Energía Mediante Vapor, Aire o Gas. W. H. Severns, H. E. Degler y J. C. Miles. Edit. Reverté, S. A. p.p. 352 - 355.

- . Acción del Venturi en un carburador.

Motores de Combustión Interna, Análisis y Aplicaciones
Edward F. Obert, CECSA, México, 1974. p.p. 420 - 424

PRACTICA 10

MOTOR DE AIRE CALIENTE (STIRLING) OPERANDO COMO MAQUINA TERMICA

- OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

EL ALUMNO:

- 1.- Identificará los procesos del ciclo Stirling ideal y comparará estos con las etapas de funcionamiento del ciclo real.
- 2.- Observará la transformación de calor en trabajo mecánico.
- 3.- Calculará la eficiencia térmica, la eficiencia mecánica y la total del motor Stirling.

- ANTECEDENTES

La transformación de calor en trabajo se realiza en la práctica en 2 tipos de motores, el motor de combustión externa (como el motor Stirling y el ciclo Rankine) y el motor de combustión interna (como el motor de gasolina y el de aceite combustible).

El motor de ciclo Stirling fue propuesto en 1816 por un clérigo de Iglesia de Escocia, Robert Stirling (1790-1878). Dicho ciclo se compone de 2 procesos isotérmicos reversibles y dos procesos reversibles a volumen constante.

Por muchos años el Ciclo de Stirling tuvo sólo un interés teórico, pero desde la década de 1950, se han realizado trabajos diversos para idear un motor práctico.

Los motores que se han construido operan a presiones muy elevadas y los fluidos de trabajo más apropiados se han visto que son el helio y el hidrógeno. Su relación peso-potencia no es muy favorable, excepto posiblemente en el caso de vehículos grandes como camiones y autobuses; tiene ventajas sobre los motores de combustión interna como la combustión que es mucho más completa, su funcionamiento es relativamente más silencioso, no produce una contaminación tan grande como

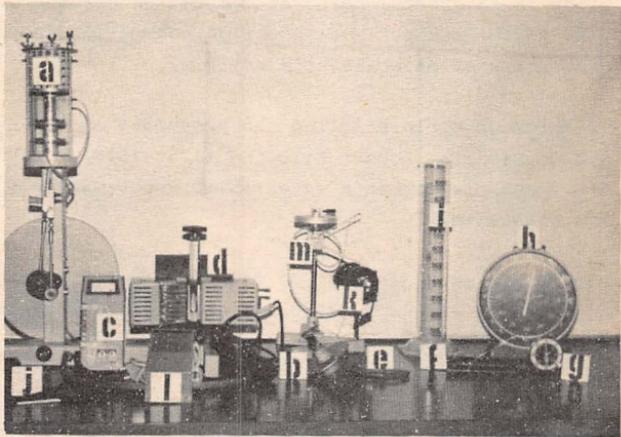
los de combustión interna, tiene una gran confiabilidad y larga vida, además puede usar una gran variedad de combustibles.

En 1976, Ford Motor Company instaló una máquina Stirling experimental de 170 h.p. en un Automóvil Torino 1975. El motor de 4 cilindros tenía un desplazamiento de 0.86 litros (52.5 pulgadas cúbicas) y funcionaba con hidrógeno como fluido de trabajo. La máxima presión de operación en el ciclo era de unos 18 MPa (2600 psia) y la temperatura de la punta calefactora era de aproximadamente 760°C (1400°F).

En todo el mundo prosiguen los trabajos de investigación y de perfeccionamiento para lograr una máquina Stirling práctica.

- EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO POR EL PROFESOR

- a) Motor de aire caliente
- b) Brida con resistencia calefactora
- c) Multímetro digital
- f) Dinamómetro (0-12 kg)
- g) Tacómetro (0-3500 RPM)
- h) Cronómetro
- i) Probeta graduada (1000 ml)
- j) Termómetro electrónico de termopar (0-110°C)
- m) Equipo diagramador (v-P)
- j) Transformador de voltaje (127-220 V.C.A.)
- d) Transformador con voltaje variable en el secundario (fuente de poder) ($127 + \frac{20}{2}$ V.C.A.)
- l) Transformador (220 - 6 V.C.A.)



- DESARROLLO

NOTA: Vea el manual de operación del motor antes de arrancarlo.

Actividad 1.

El profesor señalará las partes que componen al motor y la función que desempeñan cada una de éstas. Además moverá lentamente el motor para observar los procesos del ciclo y la conversión de calor en trabajo.

Actividad 2.

Se hará un balance térmico del motor para poder evaluar su eficiencia térmica.

$$\eta = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{suministrado}}} \quad (1)$$

El trabajo neto se puede calcular mediante el diagrama que el propio equipo del motor genera; si se escoge adecuadamente una escala para calcular el área encerrada por el ciclo, ésta nos dará directamente el trabajo neto, ya que podemos calcular el trabajo mediante

$$W = - \int P \, dV \quad (2)$$

Como el área encerrada por el ciclo es el trabajo en un ciclo, debemos multiplicar este valor por el número de ciclos por segundo que efectúa el motor y así obtener la potencia neta entregada por el motor (también llamada POTENCIA INDICADA).

$$\dot{W}_n = N W_n \quad (3)$$

\dot{W}_n .- Potencia neta o potencia indicada

N .- Número de ciclos por segundo que efectúa el motor

W_n .- Trabajo neto = área que genera el diagramador en el plano $v - P$

El calor suministrado puede calcularse conociendo la diferencia de potencial aplicada y el valor de la resistencia calefactora.

$$\dot{Q}_s = R I^2 \quad (4)$$

De esta manera, la ecuación (1) puede escribirse como

$$\eta = \frac{N \dot{W}_n}{R I^2} \quad (5)$$

donde $N = \frac{R P M}{60}$ ya que por cada revolución en el eje o cigüeñal se completa un ciclo (igual que en los motores de combustión interna de 2 tiempos o carreras).

Ahora bien, al ser un poco más cuidadosos y calcular el calor efectivo que se le suministra al aire (sustancia de trabajo), podemos argumentarlo siguiente:

al aplicársele una diferencia de potencial y hacer circular una cierta corriente por la resistencia eléctrica, no toda la energía calorífica que sale de dicha resistencia se suministra a la sustancia de trabajo, ya que se verifica también una transmisión de calor directamente al medio ambiente, esto es, la energía suministrada se puede descomponer en varios términos:

$$R I^2 = \dot{W}_n + \dot{Q}_R + \dot{E}_{nC} \quad (6)$$

donde:

$R I^2$.- Potencia suministrada

\dot{W}_n .- Potencia neta o indicada (es el trabajo por unidad de tiempo que se transmite sobre el émbolo del motor)

\dot{E}_{nC} .- Potencia que no se puede medir (pérdidas de potencia).

\dot{Q}_R .- Potencia calorífica que se rechaza al medio ambiente (sumidero)

este calor rechazado incluye las pérdidas por el rozamiento de los pistones desplazador y de trabajo, esto es:

$$\dot{Q}_R = \dot{Q}_B + \dot{P}_{fr} \quad (7)$$

\dot{Q}_B .- Potencia calorífica que no pudo convertirse en trabajo útil

\dot{P}_{fr} .- Potencia perdida por la fricción de los émbolos con la pared interior del cilindro (estas pérdidas se transmiten como calor a la camisa de agua de enfriamiento).

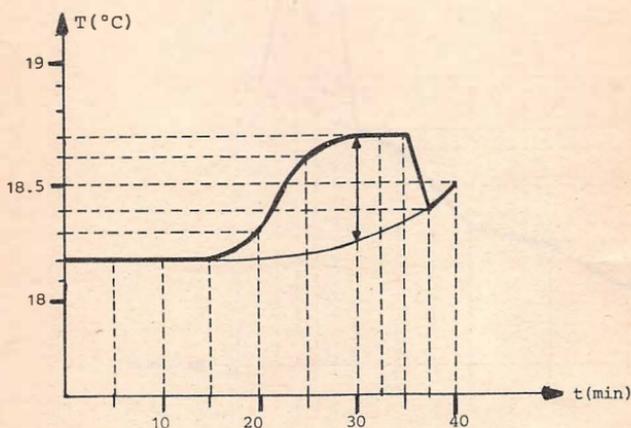
Este último término se ha calculado haciendo trabajar a los émbolos con un motor adicional y registrando las elevaciones de temperatura en el gasto de agua de enfriamiento.

$$P_{fr} = \dot{m}_a C_p \Delta T \quad (8)$$

\dot{m}_a .- Gasto de agua de enfriamiento en g/s

$C_p = 4.184 \frac{J}{g \cdot K}$ capacidad térmica específica del agua a 18°C*

ΔT .- Variación de la temperatura del agua de enfriamiento (en °C o K) que como se verá a continuación, dicha diferencia es un promedio de dicha variación.

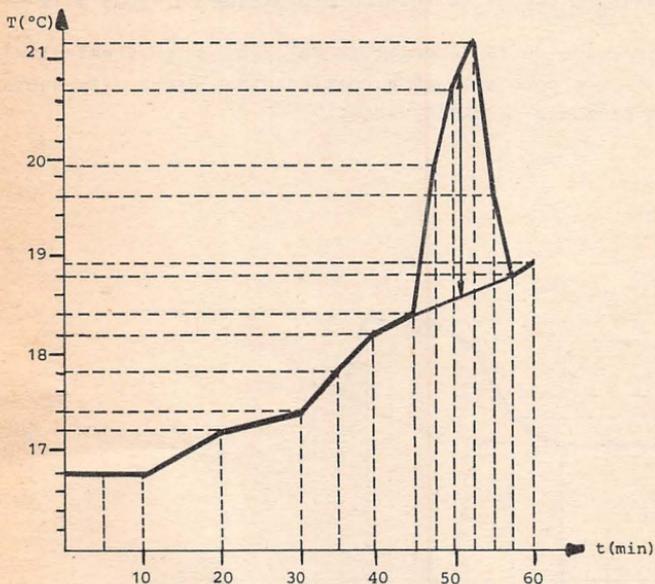


*Tomado de la gráfica de W. J. de Hass, 1950, p. 90, Calor y Termodinámica, Mark W. Zemansky Edit. Aguilar, 1979, España.

Recalcamos nuevamente que \dot{Q}_R incluye las pérdidas por rozamiento de los émbolos y al calcular la potencia calorífica rechazada.

$$\dot{Q}_R = \dot{m}_a C_p \Delta T \quad (9)$$

se observará que ahora el ΔT será notablemente mayor (ver figura) debido a que el agua de enfriamiento debe recoger el calor rechazado que no pudo convertirse en trabajo y el calor producido por la fricción de los émbolos con el cilindro.

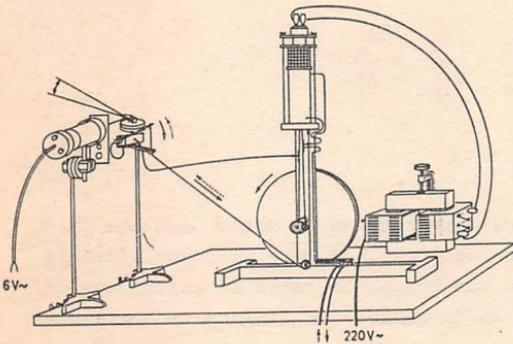


NOTA: El profesor dará una breve explicación del porque de la forma y utilización de las gráficas de la variación de temperatura del agua de enfriamiento.

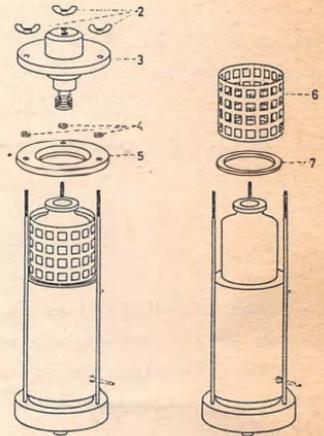
Por último, el término \dot{E}_{nc} lo podemos calcular a partir de la ecuación (6).

$$\dot{E}_{nc} = R I^2 - \dot{W}_n - \dot{Q}_R \quad (10)$$

y que representa pérdidas que NO se pueden CUANTIFICAR (nc) debido a que son por ejemplo: rozamiento en todas las partes móviles, transmisión de calor de la resistencia eléctrica al aire circundante, energía que consume el graficador, etc.



Instalación del graficador



Cámara de compresión y Brida con la resistencia calefactora.

Ahora bien, una vez que ya se ha hecho el balance térmico del motor, se puede hacer mención y entender con más facilidad los siguientes conceptos:

$$\eta_T \text{.- Eficiencia térmica} = \frac{\dot{W}_n}{\dot{Q}'_S} \quad (11)$$

es la razón de la potencia neta suministrada al émbolo de trabajo a, la potencia calorífica suministrada a la sustancia de trabajo.

Debe notarse que $\dot{Q}'_S > \dot{Q}'_S$ ya que $\dot{Q}'_S = R I^2$ (ver ecuación (4)) y $\dot{Q}'_S = \dot{W}_n + \dot{Q}_R$ (12)

Así pues, la ecuación (11) se puede escribir como:

$$\eta_T = \frac{\dot{W}_n}{\dot{W}_n + \dot{Q}_R} \quad (11')$$

$$\eta_m \text{.- Eficiencia mecánica} = \frac{\dot{W}_f}{\dot{W}_{ind}} \quad (13)$$

es la razón de la potencia al freno (\dot{W}_f) a, la potencia indicada (\dot{W}_{ind})

Debido a que la $\dot{W}_n = \dot{W}_{ind}$ ya que es la potencia neta sobre el émbolo de trabajo:

$$\eta_{TOT} \text{- Eficiencia total} = \frac{\dot{W}_f}{\dot{Q}'_s} = \frac{\dot{W}_f}{\dot{W}_{ind}} \times \frac{\dot{W}_n}{\dot{Q}'_s} \quad (14)$$
$$\eta_{TOT} = \eta_m \times \eta_T$$

La potencia al freno es la potencia que entrega el motor pero con carga, es decir, haciéndolo mover un peso o aplicándole un freno hidráulico o de otro tipo. En el caso que nos ocupa, la carga se aplica con un freno de rozamiento con una rejilla de cobre y un dinamómetro para medir el par

$$\dot{W}_f = F d N = F 2 \pi r N \quad (15)$$

donde:

- F.- Es el par, aplicado en la periferia de la flecha
- r.- Es el radio de la flecha
- N.- Véase ecuación (5)

NOTA: Para agilizar los cálculos, considérense los siguientes datos:

$$\begin{array}{ll} \text{(Pérdidas por fricción)} & P_{fr} = 1.4175 \frac{J}{\text{revolución}} \times N \\ \text{(Resistencia calefactora)} & R = 1.1\Omega \end{array}$$

El profesor indicará en forma más concreta, la manera de hacer los cálculos necesarios para alcanzar los objetivos de aprendizaje.

- DISCUSION

Respecto a la actividad 1:

- ¿Qué diferencias existen entre el ciclo ideal de Stirling y los procesos reales que se llevan a cabo en el motor?
- ¿Qué función desempeña el regenerador y de qué está constituido?
- ¿La potencia calorífica suministrada al motor, puede provenir de algún combustible o puede utilizarse al sol?
- Mencione al menos 4 ventajas y 4 desventajas de este motor de combustión externa en comparación con los motores de combustión interna.

Respecto a la actividad 2:

- Si se dice que la eficiencia mecánica se refiere al motor y la eficiencia térmica se refiere propiamente al ciclo ¿estaría Ud. de acuerdo? ¿por qué?
- ¿Estaría ud. de acuerdo si se dice que la eficiencia total DEL MOTOR se calcula mediante $\eta_{TOT} = \frac{\dot{W}_t}{R I^2}$?
- ¿Qué diferencias hay en las siguientes dos expresiones?

$$\eta_{TOT} = \frac{\dot{W}_f}{R I^2}$$

$$\eta_{TOT} = \frac{\dot{W}_f}{\dot{W}_n + \dot{Q}_R}$$

- APLICACIONES

- ¿Es posible usar el ciclo Stirling en un refrigerador? ¿Cómo y qué temperaturas se pueden alcanzar?

Véase "Termodinámica" Kenneth Wark, p. 657-659.

"Calor y Termodinámica" Zemansky y Dittman p. 146-149 y p. 157 - 159.

- Máquinas de ciclo Stirling, varios usos, diferentes arreglos, varios combustibles. Desde 1817 hasta 1977.

Stirling Cycle Engines.

Library of Congress Catalog number 77-91344

Printed en USA Solar Engines. A Division of Jemco Importes Inc. 4020 East Mc Dowell Road. Phoenix, Arizona 85008.

- El motor Stirling, ventajas que confiere, generador de electricidad descentralizada, gráficas comparativas con motores de ciclo Bryton, Diesel y de gasolina, etc.

Mundo Científico p. 130-139

La Recherche

No. 44

PRACTICA 11

MOTOR DE AIRE CALIENTE (STIRLING)

OPERANDO COMO BOMBA DE CALOR

- OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

EL ALUMNO:

1. Identificará la secuencia de los procesos del ciclo Stirling operando como refrigerador.
2. Calculará el coeficiente de operación del refrigerador de ciclo Stirling.

- ANTECEDENTES

Si conocemos el funcionamiento de una máquina térmica la cual absorbe calor de un depósito térmico de alta temperatura y parte la trasmite a un sumidero; también podemos intuir el funcionamiento de una bomba de calor al imaginarnos a la máquina térmica operando con el mismo ciclo pero, con la secuencia de procesos invertida.

El ciclo Stirling puede invertirse y da lugar a uno de los tipos más útiles de frigoríficos.

Este tipo de refrigeración ha sido utilizado por varias empresas para la construcción de frigoríficos que producen temperaturas muy bajas (90 K o hasta 12 K)*.

El ciclo Stirling tiene algunas ventajas inherentes al funcionar en dirección inversa, es particularmente efectivo en la obtención de temperaturas en el intervalo de -100 a -200°C .

Como se observó en la práctica del motor Stirling operando como máquina térmica, el fluido de trabajo en un motor práctico es el helio o el hidrógeno, asimismo, en una máquina frigorífica práctica también lo será el hidrógeno y el helio.

* Calor y Termodinámica, Zemansky & Dittman, p. 157-158.

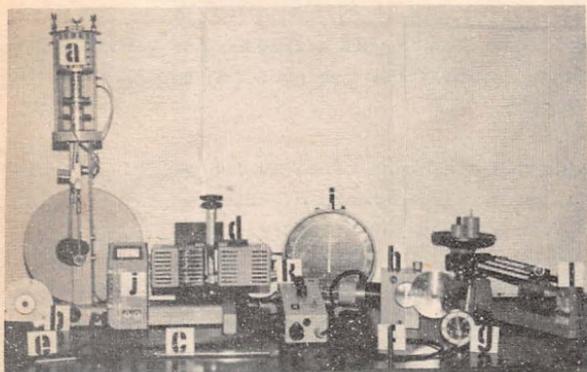
Las presiones máxima y mínima se encuentran entre los 35 y 15 bares (500 y 200 psia) respectivamente y la velocidad de la máquina es aproximadamente de 1500 rpm.*

Algunas de sus aplicaciones incluyen:

- enfriar equipo electrónico e imanes superconductores de investigación.
- secado de materiales por congelación.
- preenfriador en la licuefacción de hidrógeno y helio.
- separador de gases (licuefacción de nitrógeno a partir de aire).

EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO POR EL PROFESOR

- a) 1 motor de aire caliente.
- b) 1 acoplamiento para tubo de ensayo o termómetro.
- c) 1 termómetro (-50 a 120°C) y 1 tubo de ensayo
- d) 1 núcleo en "U" con yugo y dispositivo de sujeción (fuente de poder 127-20₂ v.c.a.)
- e) 1 termómetro electrónico de termopar (0-110°C)
- f) 1 banda toroidal de hule (47 cm)
- g) 1 tacómetro (3500 RPM)
- h) 1 motor eléctrico (220 v.c.a., 100 W)
- i) 1 cronómetro
- j) 1 multímetro digital
- k) 1 unidad de control del motor eléctrico (220 v.c.a., 50/60 Hz)
- l) 1 balanza (1100 g)
- m) 1 transformador (127-220 v.c.a.)



DESARROLLO

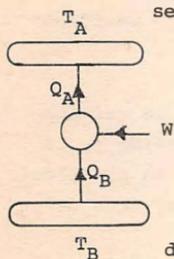
NOTA: Antes de operar el refrigerador stirling, consulte el manual correspondiente.

* Wark Kenneth, Termodinámica, p. 739.

Actividad 1. El profesor explicará la nueva secuencia de procesos, así como el porque del sentido del giro del volante del motor.

Además, se identificarán los depósitos térmicos de alta y baja temperatura.

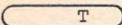
Actividad 2. De acuerdo con la nomenclatura más común en este curso, el coeficiente de operación de una bomba de calor se puede expresar como sigue:



$$\beta_R = \frac{Q_B}{W} \quad (1)$$

$$\beta_C = \frac{Q_A}{W} \quad (2)$$

donde:

 T .- depósito térmico de alta o baja temperatura.

Q_B .- calor que se absorbe del depósito térmico de baja temperatura.

Q_A .- calor transmitido al depósito de alta temperatura.

W .- trabajo que consume la bomba de calor.

β_R .- coeficiente de operación de la bomba de calor operando como refrigerador (en este caso, el objetivo es que Q_B sea cada vez mayor).

β_C .- coeficiente de operación de la bomba de calor, operando como calefactor, (en este caso el objetivo es transmitir calor al depósito de alta temperatura).

Como el caso que nos ocupa es β_R y, haciendo un balance de energía en la figura anterior, $Q_B + W = Q_A$, por tanto:

$$\beta_R = \frac{Q_B}{Q_A - Q_B} \quad \circ \quad \beta_R = \frac{\dot{Q}_B}{\dot{Q}_A - \dot{Q}_B}$$

$$\text{donde } \dot{Q}_B = VI = \frac{V^2}{R} = I^2 R \quad (3)$$

Al frigorífico se le dará carga térmica (calor que se retira del depósito de baja temperatura) mediante una resistencia eléctrica; el valor de \dot{Q}_B se calculará de acuerdo con la ecuación (3) siempre y cuando se mantenga la temperatura constante del recinto donde se encuentra tal resistencia eléctrica.

El potencial aplicado estará entre los valores de 4.5 y 5 v.c.a. y el valor de la resistencia es de 1.1Ω . (Esto se puede verificar o rectificar en el momento de realizar las mediciones).

El depósito de alta temperatura lo constituye el agua de refrigeración que circula por la camisa de la cámara de compresión y, la cantidad de energía suministrada a este depósito (\dot{Q}_A) se puede calcular mediante el cambio de entalpía que experimenta el agua de enfriamiento desde la camisa hasta el desagüe.

$$\dot{Q}_A = \dot{m}_a C_p \Delta T \quad (4)$$

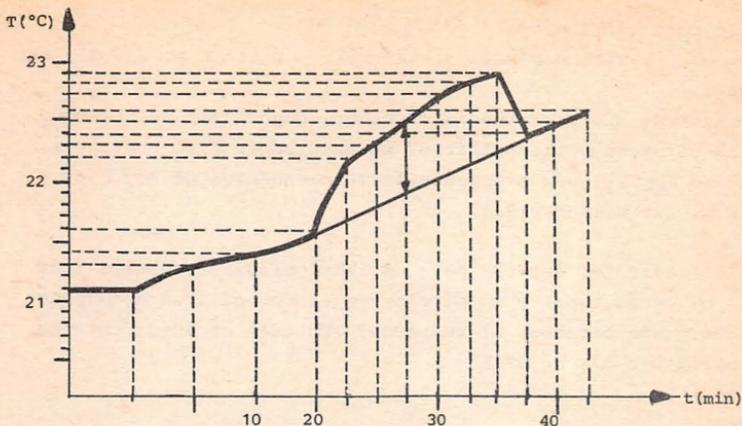
\dot{m}_A = gasto de agua de enfriamiento

C_p = capacidad térmica específica del agua

ΔT = variación de temperatura promedio

Debe observarse que, \dot{Q}_A es un poco mayor que el valor calculado con la ecuación (4) puesto que también van a dar al ambiente las contribuciones de energía que escapan del motor que mueve al refrigerador.

Por otra parte, la ΔT promedio se calcula como se muestra en la gráfica siguiente.



Una vez calculados \dot{Q}_A y \dot{Q}_B , el coeficiente de operación (COP) del refrigerador será:

$$\beta_R = \frac{\dot{Q}_B}{\dot{Q}_A - \dot{Q}_B} = \frac{1}{\frac{\dot{Q}_A}{\dot{Q}_B} - 1} \quad (5)$$

- DISCUSION

Respecto a la actividad 1.

¿Qué diferencias observa usted en el motor stirling al operar como máquina térmica y como refrigerador?

¿Cuál es la sustancia de trabajo? ¿Se pueden usar otras?

¿Cuál es la temperatura mínima que se puede obtener?

¿Puede reducirse tal temperatura si se utiliza otra sustancia de trabajo?

¿Tiene mejor funcionamiento este ciclo operando como refrigerador que como máquina térmica?

Respecto a la actividad 2.

¿Cómo se obtendría el coeficiente máximo (ideal)? ¿puede calcularlo?

¿Se puede obtener el trabajo suministrado al refrigerador, directamente del motor que lo suministra. Sugiera la forma

- APLICACIONES

La máquina de ciclo stirling ¿tiene aplicaciones industriales fun-

cionando como refrigerador?

Véase -Calor y Termodinámica de Zemansky y Dittman p. 157-159 Mc. Graw-Hill.

¿Existen otros ciclos termodinámicos que pueden ser usados como máquinas térmicas y frigoríficos? Dé un ejemplo ¿Qué sustancia de trabajo emplea? véase Ingeniería Termodinámica de Reynolds y Perkins p. 359 Mc. Graw-Hill.

Investigue el valor del COP para un refrigerador doméstico (por ejemplo el de su casa) y compárelo con el obtenido en esta práctica ¿qué puede comentar al respecto? ¿En cuál se puede obtener una temperatura más baja?

PRACTICA 12

REFRIGERADOR POR COMPRESION DE VAPOR

OBJETIVOS:

EL ALUMNO:

- Establecerá el valor de las propiedades termodinámicas relevantes en los cuatro estados más importantes del ciclo de refrigeración por la compresión de vapor.
- Representará gráficamente los procesos que conforman dicho ciclo.

ANTECEDENTES:

La refrigeración consiste en mantener una región a una temperatura más baja que la de sus alrededores. Este hecho es muy importante pues permite mantener alimentos y productos naturales en buen estado durante períodos de tiempo bastante largos (desde varios días hasta algunos meses). Sin embargo, la humanidad no pudo disponer de sistemas de refrigeración "artificial" sino hasta la última parte del siglo XIX. Antes de esa época la única manera de refrigerar consistía en el empleo de hielo¹, el cual mantenía frescas otras sustancias quitándoles el calor necesario para fundirse. En la antigüedad el hielo que se usaba provenía casi exclusivamente del pico de las montañas o de las capas congeladas de los lagos. El hielo se guardaba para su empleo en el verano en recipientes adecuados o aún en pequeños hoyos en el suelo, que se aislaban con paja. En países sin inviernos tan rigurosos el hielo se "fabricaba" según otros métodos*.

* Véase en la "Enciclopedia Británica", tomo 15, p. 563 cómo se obtenía hielo en el antiguo Egipto.

¹ O casi Véanse los artículos "Jarras refrigerantes" y "una nevera sin hielo", p. 151 de "Física Recreativa", vol. II, de Yakov Perelman, & Ed Mir, 1980.

Una vez disponiendo del hielo, se descubrió que se podían alcanzar temperaturas inferiores a los 0 °C añadiéndole sales. Con la sal de cocina se puede llegar a -21 °C y con cloruro de calcio hasta -55 °C. Gracias a este conocimiento se pudieron fabricar helados desde mucho antes del siglo XIX. Aún en nuestros días, los vendedores ambulantes de helados recorren a la sal de cocina y al hielo para fabricar y conservar sus productos.

A comienzos del siglo XX la refrigeración doméstica se efectuaba colocando bloques de hielo dentro de la "nevera", que era un gabinete construido con paredes aislantes. El avance en la tecnología permitió que el hielo se fabricará artificialmente, en lugar de tomarlo de las fuentes naturales.

El primer refrigerador artificial se construyó en 1844, empleando la compresión y la expansión de un gas⁺. Este modelo resultaba poco eficiente y fue mejorado en 1856, surgiendo el ciclo llamado de compresión de un vapor. Aunque mejor que el ciclo con gas, este esquema requiere de un gran trabajo de compresión. El tercer esquema de interés comercial se propuso en Francia en los años 50 del siglo XIX, conocido como el ciclo de refrigeración por absorción.

Cualquiera que fuera el esquema del refrigerador, la refrigeración doméstica seguía dependiendo del hielo. Es por ello que cuando se necesitó una unidad para cuantificar la habilidad refrigerante de una máquina se recurrió a las características del hielo.

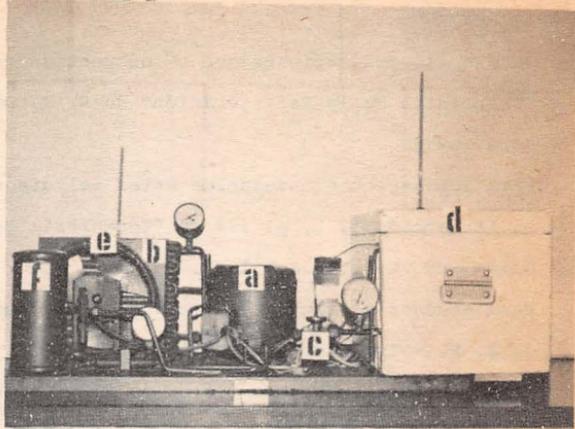
En nuestros días, la potencia refrigerante se cuantifica en toneladas de refrigeración: la cantidad de calor que hay que retirar en 24 horas para conseguir que 2000 libras de agua a 0 °C se transformen en hielo.

⁺ Véase la misma referencia en la Enciclopedia Británica.

EQUIPO NECESARIO :

Una unidad de refrigeración por brigada:

- a) Compresor
- b) Condensador
- c) Válvula de expansión
- d) Evaporador (congelador)
- e) Sistema de enfriamiento del aceite
- f) Tanque de almacenamiento de refrigerante



DESARROLLO:

El profesor hará una descripción de los componentes de la unidad de refrigeración, discutiendo su finalidad. Indicará la mejor técnica para tomar las lecturas necesarias.

DISCUSION:

¿Qué función específica realizan la válvula estranguladora, el compresor, el evaporador y el compresor?

En los ciclos de refrigeración con gas y en el que se estudia en la práctica (por compresión de vapor) se comprime a una sustancia en la fase gaseosa; en la parte de antecedentes se afirma que el segundo es mejor.

¿Cuál es la razón?

Busque en las tablas del refrigerante adecuado los valores de las propiedades que se necesitan para calcular el trabajo del compresor, el calor que se toma en el evaporador y el calor que se rechaza en el condensador.

¿Para qué sirve el ventilador que se encuentra junto al condensador?

¿Cómo es la gráfica de los procesos que se llevan a cabo en la máquina refrigeradora de un diagrama (h, P)?

APLICACIONES:

- . Veáanse las aplicaciones que se encuentran en el capítulo 9, p. 159 de "Principios de la Refrigeración" de R. J. Dosset, Ed. John Wiley & Sons, 1978.
- . Para los aspectos necesarios antes del diseño de un refrigerador, véase la sección 13.1, p. 374 de "Ingeniería Termodinámica", de F. F. Huang, Ed. C.E.C.S.A., 1981.
- . Para escoger al fluido de trabajo más adecuado, veáanse: "Termodinámica", de J. P. Holman, p. 449, Ed. Mc Graw Hill e "Ingeniería Termodinámica", de M. D. Burghardt, Ed. Harla, p. 248. Veáanse los ejemplos resueltos 13.1 y 13.2 de "Ingeniería Termodinámica", de Huang, p. 378 para comparar las bondades de dos refrigerantes distintos.
- . Para ver otros ciclos de refrigeración, consúltese la sección 13.4 de "Ingeniería Termodinámica" de Huang, p. 379 y el ejemplo resuelto 13.3, p. 381 (refrigerador con un gas). Véase la sección 12.5, p. 259 de "Ingeniería Termodinámica" de M. D. Burghardt. Consulte también el ejemplo 12.4, p. 265.
- . Criogenia. Para estudiar la licuafacción de un gas, las secciones 14.2 y 14.3, p. 395 de "Ingeniería Termodinámica" de Huang.

APENDICE A

CUESTIONARIOS PREVIOS

CUESTIONARIO 1

- 1.- Calcule el peso y la incertidumbre correspondiente de un cuerpo cuya masa es $(50 \mp 0.5 \text{ kg})$ si la aceleración gravitacional es $(9.78 \pm 0.02 \text{ m/s}^2)$.
- 2.- Defina los conceptos de densidad (ρ) y de peso específico (γ).
- 3.- Busque en las tablas de propiedades termodinámicas los valores de la densidad del agua y del mercurio a 20°C y la presión ambiente normal.
- 4.- Explique el concepto de presión.
- 5.- Señale los argumentos que le permitan clasificar a la presión como:
 - a) Una magnitud escalar.
 - b) Una propiedad intensiva.
- 6.- Indique cómo varía la presión en los fluidos en reposo.
- 7.- Señale los términos del vector gradiente de presión en los fluidos en reposo. Explique el significado de cada término.
- 8.- Clasifique a la presión que se mide mediante un barómetro (como el de Torricelli) como relativa o absoluta. Justifique su respuesta.
- 9.- ¿Qué es la presión atmosférica?
- 10.- Describa el experimento de Torricelli con el que descubrió el principio de funcionamiento del barómetro que lleva su nombre.
- 11.- ¿Cuál es el valor de la presión del ambiente en México, D.F.? Exprese su valor en centímetros de mercurio y en kilopascals.
- 12.- Describa el funcionamiento de un manómetro de Bourdon.
- 13.- Escriba la ecuación que relaciona a la presión absoluta con la presión ambiente y con la presión relativa.

CUESTIONARIO 2

1. ¿Qué se entiende por una sustancia termométrica?
2. ¿Por qué se dice que las escalas de Celsius y Fahrenheit son empíricas?
3. ¿Por qué se emplea la temperatura absoluta en la ecuación del gas ideal?
4. Investigue la temperatura de licuefacción (a la presión normal) del nitrógeno (N_2), del hidrógeno (H_2), del helio (He), del oxígeno (O_2) y del bióxido de carbono (CO_2).
5. ¿A qué estado se le llama el "punto triple"?
6. Escriba los datos de presión (en kPa) y de temperatura (en K), que correspondan al punto triple del nitrógeno (N_2), del hidrógeno (H_2), del helio (He), del oxígeno (O_2) y del bióxido de carbono (CO_2).
7. ¿Es posible encontrar los parámetros del punto triple del aire? ¿Por qué?
8. Escriba las expresiones para la pendiente (m) y el intercepto (b) que resultan del método del mínimo de los cuadrados.
9. ¿Qué información aporta el coeficiente de correlación?

Consulte la bibliografía que se cita en la práctica.

Vea también: "Termodinámica", de K. Wark, 4a. edición, Mc. Graw-Hill, Capítulo IV.
"Métodos experimentales para ingenieros" de J.P. Holman, 2a. edición, Mc. Graw-Hill, capítulo III.

CUESTIONARIO 3

1. Señale las diferencias que existen entre el calor y el trabajo.
2. ¿Por qué no es conveniente hablar del "contenido de calor" de un sistema?
3. ¿Por qué es inconveniente hablar del "contenido de trabajo" de un sistema?
4. Investigue cuáles fueron los dispositivos que empleó James P. Joule para establecer la equivalencia entre el calor y el trabajo y descríbalos brevemente.
5. Escriba la ecuación que permite calcular el trabajo asociado al torque que actúa sobre un eje.
6. Escriba la ecuación que permite cuantificar el cambio en la energía interna de una fase condensada (sólida o líquida). ¿Cómo se puede modificar el valor de la energía interna de una fase condensada?
7. Se tienen masas iguales de tres sustancias distintas (sólidas o líquidas) (A, B y C) inicialmente a la misma temperatura. Si al recibir la misma cantidad de calor se observa que $\Delta T_A > \Delta T_C$ y que $\Delta T_C > \Delta T_B$, clasifique, de mayor a menor, las capacidades térmicas específicas de las sustancias A, B y C.

CUESTIONARIO 4

1. Escriba la ecuación que permite cuantificar la transmisión o recepción de calor "sensible".
2. Defina la entalpía de cambio de fase.
3. ¿Qué relación existe entre el antiguo concepto del "calor latente" de cambio de fase y la entalpía de transformación (llamada entalpía de cambio de fase)?
4. Si se efectúa una transición de fase a presión constante, ¿qué sucede con la temperatura?
5. Investigue los valores de la entalpía de vaporización del agua a 101.325 (kPa) y 78 (kPa).
¿Cuál es el valor de la temperatura de saturación en cada caso?
6. Investigue qué es un calorímetro de vacío (o vaso de Dewar) y cuál es su uso.
7. ¿Qué es el efecto de Joule (llamado también "ley" de Joule)?
8. ¿Qué instrumento permite cuantificar el consumo de energía eléctrica?

Vea por ejemplo "Física", parte 2, de D. Halliday y R. Resnick, Ed. C.E.C.S.A., capítulo 31.

CUESTIONARIO 5

1. ¿Qué información aporta la ecuación de Clapeyron a un diagrama (T, P)?
2. Escriba para el agua los valores del volumen que ocupan el líquido y el vapor a 78 (kPa).
3. Indique el signo que tiene la pendiente de la línea de fusión del agua. ¿Se puede emplear esta observación para justificar que el hielo flote en el agua? ¿Cómo sería el argumento?
4. ¿Cuáles son las condiciones para que las dos fases puedan existir en equilibrio?
5. Si se tiene una relación del tipo: $\ln y = \frac{A}{T} + B$. ¿Cómo se podría transformar para que resulte la ecuación de una línea recta?

CUESTIONARIO 6

1. Escriba la constante universal de los gases en el S.I.
2. ¿Cómo se puede obtener la constante particular de un gas partiendo de la constante universal?
3. Defina el concepto de coeficiente de compresibilidad isotérmico.
4. Escriba las unidades (en el S.I.) que tiene el coeficiente de compresibilidad isotérmico.
5. ¿Por qué aparece un signo negativo en la definición del coeficiente de compresibilidad isotérmica?
6. Con los valores que aparecen en las tablas de vapor de agua calcule el coeficiente de compresibilidad isotérmico a 0.8 (MPa) y 250(°C) y también a 1.0 (MPa) y 250(°C). Compare sus resultados.
7. Use la carta del factor de compresibilidad generalizado (Z) para decidir si el aire es un gas ideal o no en los estados que siguen:
 - a) 78 (kPa) y 20(°C)
 - b) 160 (kPa) y 20(°C)
 - c) 240 (kPa) y 20(°C)

CUESTIONARIO 7

1. Se sabe que $C_p - C_v = T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$.

Valúe esta expresión para un gas ideal. (El resultado se conoce como la fórmula de Mayer).

2. La expresión para un proceso politrópico es $Pv^n = \text{constante}$. Si se tiene un gas perfecto, indique el valor que tiene el exponente politrópico n para un proceso:
- adiabático
 - isométrico
 - isotérmico
 - isobárico
3. Dibuje (cualitativamente) los procesos de la pregunta 2 en un diagrama (v , P).
4. De entre los valores que se encontraron en la pregunta dos, ¿cuáles son válidos exclusivamente para un gas perfecto? ¿cuáles son válidos en general?
5. Una cierta cantidad de gas perfecto se encuentra originalmente en el estado P_1 , v_1 y se puede expandir hasta v_2 mediante un proceso isotérmico (hasta P_T) o mediante un proceso adiabático (hasta P_A).
- Deduzca una expresión que relacione a P_A con P_T .
 - ¿Cuál de entre P_A y P_T es mayor?
 - Ilustre los procesos en un diagrama (v , P).
6. Desarrolle en series de Taylor (alrededor de cero) la función $\ln(1 + x)$. Exprese su desarrollo hasta la potencia cúbica de la variable.
- ¿Cuál es el límite de $\ln(1 + x)$ cuando $x \ll 1$? Compruebe su respuesta calculando el valor del desarrollo en series de potencias cuando $x = 0.00625$.
7. Exprese la presión barométrica de 78 (kPa) en altura de la columna de un líquido cuya densidad relativa es:
- 13.595
 - 1
 - 0.8
 - 0.67

CUESTIONARIO 8

1. Defina el concepto de estrangulación.
2. ¿Qué se entiende por la calidad de un vapor húmedo?
3. ¿Cuál es la propiedad termodinámica que permanece constante en una estrangulación adiabática?
4. ¿Se encuentra perfectamente definido el estado de agua a 450(kPa) y 147.93 (°C)?
5. Dibuje en un diagrama (s, T) y en un diagrama de Mollier (s, h) las líneas de calidad constante, de presión constante y de entalpía constante.

CUESTIONARIO 9

1. Explique en qué consisten las condiciones de flujo unidimensional, flujo estable y estado estable aplicados a un sistema abierto.
2. Escriba la ecuación de la 1a. ley aplicada a un sistema abierto en condiciones de flujo y estado estables.
3. Si se aumenta la presión de un líquido incompresible (como el agua) en un proceso adiabático, ¿cómo es la variación de la temperatura?
4. ¿Existe una transmisión de calor importante durante el flujo de agua a lo largo de la red de agua potable? Si es así, ¿en qué dirección?
5. Escriba la ecuación de Bernoulli y compare sus términos con los de la ecuación de la pregunta 2.
6. Señale las principales diferencias que hay entre una bomba de desplazamiento positivo y una centrífuga.

CUESTIONARIO 10

1. Indique los procesos que componen al ciclo de Stirling.
2. Defina un regenerador.
3. Dibuje los procesos del ciclo de Stirling en un diagrama (v, P). Señale el sentido de cada proceso.
4. ¿Qué es el diagrama del indicador?
5. Escriba la expresión de la eficiencia ideal del ciclo de Stirling.



CUESTIONARIO 11

1. Escriba los procesos que componen al ciclo de Stirling de refrigeración.
2. Dibuje este ciclo en el diagrama (v, P). Señale el sentido de cada proceso.
3. Escriba la expresión para el rendimiento térmico del refrigerador de Stirling ideal.
4. ¿Qué sustancia de trabajo debe emplearse para que el ciclo de Stirling funcione como refrigerador?
5. Los procesos que componen a este ciclo de refrigeración son los mismos que los que se necesitan para entregar trabajo, pero en sentido contrario. ¿Garantiza este hecho que el ciclo sea reversible? ¿Cómo se podría confirmar o desacreditar esta aseveración?



ESCUELA DE INGENIERIA

CUESTIONARIO 12

1. Defina el coeficiente térmico de un refrigerador.
2. ¿Qué diferencia existe entre una bomba térmica que funciona como calefactor y una que funciona como refrigerador?
3. Escriba los procesos que componen un ciclo de refrigeración por la compresión de un vapor. Indique el equipo necesario en cada caso.
4. Defina el concepto de la "tonelada de refrigeración" y señale su valor en el SI.
5. El refrigerante se estrangula entre el condensador y el compresor. ¿Cómo debe ser el coeficiente de Joule-Thomson del refrigerante: positivo o negativo? ¿Por qué?
6. En la respuesta 3 se necesita una expansión. ¿Sería conveniente realizarla en una turbina para obtener trabajo y hacer así más rentable el ciclo? Explique.
7. ¿Qué ventajas tiene un estrangulador (válvula o capilar) sobre una turbina en el ciclo de refrigeración por compresión de un vapor?
8. Señale los procesos del ciclo de refrigeración por compresión de un vapor en un diagrama (h, P).
9. Investigue las cualidades que son deseables en un buen refrigerante y señale dos criterios (por lo menos) para la selección de éste en una aplicación dada.

A P E N D I C E B

TRATAMIENTO ESTADISTICO DE LOS DATOS
EXPERIMENTALES

TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Al trabajar en el laboratorio se buscan casi siempre dos cosas: 1º, encontrar el valor que le corresponde a una magnitud física y 2º, hallar la relación que liga a las distintas magnitudes físicas.

El valor de las magnitudes físicas se puede encontrar de dos maneras distintas: mediante mediciones directas y mediante mediciones indirectas.

Las mediciones directas dan como resultado inmediato un valor de la magnitud física de interés, mientras que las mediciones indirectas requieren de valores de magnitudes físicas que deben a su vez combinarse según un modelo matemático para calcular el valor de la magnitud física que se desea. El modelo matemático puede ser una definición o una ley física; las magnitudes físicas que se combinan en el modelo pueden ser el resultado, tanto de las mediciones directas como de las indirectas.

Estas mediciones se pueden ejemplificar fácilmente. Se hace una medición directa cuando se emplea un manómetro diferencial de Bourdon para medir la diferencia de presiones entre dos puntos de una tubería, puesto que la lectura del aparato da tanto las unidades de la presión como el valor numérico que le corresponde. El experimentador no tiene nada más que hacer que leer en el instrumento de medición.

Se hace una medición indirecta cuando se emplean una balanza y un picnómetro para medir la densidad de un líquido, ya que se deben tomar lecturas distintas: se deben medir las masas del picnómetro vacío y del picnómetro

metro lleno, además del volumen del picnómetro. Se debe luego recurrir a un modelo matemático que ligue a estas magnitudes físicas con la que se desea, la definición en este caso:

$$\rho = \frac{M_{\text{picnómetro lleno}} - M_{\text{picnómetro vacío}}}{V_{\text{picnómetro}}}$$

El tratamiento estadístico de las mediciones directas difiere del tratamiento de las mediciones indirectas. Antes de profundizar en este aspecto, se planteará la diferencia entre una población y una muestra.

Se considera razonable que una medida deba repetirse varias veces - a las mismas condiciones cuando se desea conocer una magnitud física, pues se tiene intuitivamente más confianza en un conjunto de medidas que en una sola medida aislada.

En la práctica de la ingeniería se considera un hecho que cada magnitud física posee un, a veces mítico, valor verdadero. Se puede tener la certeza que se le asocia el valor verdadero a una magnitud física únicamente cuando se dispone de un número suficientemente grande de mediciones.

2) Cada experimentador puede repetir una medición un gran número de veces, de tal suerte que todos los posibles experimentadores pueden tener en conjunto, a lo largo del tiempo, un número prácticamente infinito de mediciones de una misma magnitud física a las mismas condiciones. Este número infinito constituye la población de las mediciones. El valor verdadero de una magnitud física es un parámetro que pertenece a la población.

Sin embargo, es parte de nuestra experiencia que el valor que se obtiene experimentalmente no concuerda plenamente con el valor verdadero.

La diferencia que existe entre el valor verdadero (V_{VER}) y el valor experimental (V_{EX}) se llama error (E):

$$E = V_{VER} - V_{EX}$$

Hay dos razones principales para explicar la existencia de un error. La primera está asociada a la técnica de medición y a los aparatos o instrumentos que se emplean.

3 Este es el caso, por ejemplo, cuando los ojos se alinean siempre por arriba - o por debajo -, de una escala, resultando un valor consistentemente mayor - o menor - que el que se obtendría con una alineación perfecta, o cuando se usa un aparato que no se ha ajustado a cero y por tanto resultan valores consistentemente mayores o consistentemente menores que los que se obtendrían con un aparato ajustado a cero.

Si el error es el resultado de esta causa se llama sistemático.

Aunque no existe una manera segura e infalible de detectar estas fallas sistemáticas, pues en algunos casos dependen de la personalidad o de los prejuicios del experimentador, se considera que una técnica cuidadosa de medida (normalmente depurada mediante la comparación entre las medidas de diferentes experimentadores para descubrir las tendencias de cada uno) y la calibración adecuada de los aparatos (con valores "patrón" en caso necesario) son suficientes para eliminarlas.

La segunda razón o causa está asociada a la variación impredecible y aleatoria en las condiciones de la medición. Entre éstas se encuentran, por ejemplo, los criterios contradictorios por parte del observador al

3 leer una escala o al juzgar fracciones de una graduación, etc. (que se pueden considerar inconsistencias humanas) o las variaciones inesperadas e instantáneas en las condiciones climáticas o en el voltaje de la línea, o la aparición de vibraciones y perturbaciones mecánicas, etc.

Si el error se debe a esta causa se llama aleatorio.

3 Ya que estas "causas de error" son producto del azar, se verifica a lo larga que los valores mayores que el adecuado o representativo tienen la misma oportunidad de aparecer que los valores menores.

Algunos autores asocian los adjetivos "exacto" o "preciso" con las causas de error precedentes. Si no hay una causa sistemática, el resultado es exacto. Si las causas aleatorias son "pequeñas", el resultado es preciso.

En la discusión que sigue del tratamiento estadístico de los datos se considera que no hay causas sistemáticas de error.

DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS DE LAS MEDIDAS DIRECTAS.

Un conjunto de datos se puede representar con fidelidad mediante dos datos: el valor "representativo" del conjunto y una medida de qué tan alejados se encuentran los miembros del conjunto del valor "representativo".

El valor "representativo" es una medida de tendencia central. Da una indicación de la tendencia de los valores del conjunto a agruparse. El valor representativo constituye una medida de la tendencia central.

El valor más usual de la tendencia central es el promedio aritmético, que se define como la suma de todas las cantidades de interés dividida entre

el número de cantidades.

Sea $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ un conjunto de cantidades, que forman una muestra. El promedio \bar{x} se define como:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$$

en donde n es el número de cantidades.

Cuando se elige una muestra se desea en verdad obtener un estimador del parámetro correspondiente de la población. De esta forma, el promedio de la muestra, \bar{x} , es un estimador del promedio de la población, X .

Aunque existen otras medidas de la tendencia central (la moda y la mediana) este trabajo se limitará al promedio aritmético.

El promedio aritmético tiene varias características que justifican esta preferencia: i) un conjunto dado de cantidades tiene un valor único del promedio. ii) Si se extraen varias muestras de la misma población y se comparan los promedios aritméticos respectivos se observa que la diferencia entre ellos es razonablemente pequeña. iii) El promedio aritmético toma en cuenta el tamaño de la muestra. iv) Las propiedades matemáticas del promedio permiten un manejo estadístico más amplio.

Algunas veces se desea calcular el promedio de un conjunto de cantidades, de las que se piensa que algunos datos son más importantes que otros. Esto es, se encuentra razonable el dar un "peso" distinto a las cantidades individuales.

Suponga que se mide la temperatura de un sistema con un termómetro de

mercurio y con termómetro electrónico, resultando 21.41 °C y 21.37 °C. Los instrumentos son tales, que se confía más en el electrónico que en el de vidrio (se tiene el doble de la confianza en el termómetro electrónico). Una manera intuitiva de dar un valor "razonable" es considerar que la lectura del aparato electrónico cuenta el doble que la del otro instrumento.

El promedio queda entonces:

$$t = \frac{t_{elec}(2) + t_{vidr}(1)}{3} = \frac{2(21.37^{\circ}\text{C}) + 21.41^{\circ}\text{C}}{3} = 21.38^{\circ}\text{C}$$

Debe notarse que el denominador es la suma del "peso" de cada cantidad. La discusión precedente permite definir el promedio ponderado. A cada elemento x_j del conjunto de cantidades se le asocia un peso, p_j . El promedio ponderado de un conjunto de n elementos se define como:

$$\bar{x} = \frac{p_1 x_1 + p_2 x_2 + \dots + p_n x_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} = \frac{\sum_{j=1}^n p_j x_j}{\sum_{j=1}^n p_j} \dots$$

La definición del promedio ponderado es la justificación de la propiedad (iv) previamente citada.

La descripción de una muestra mediante una medida de la tendencia central es importante, pero no es suficiente.

Considere por ejemplo el conjunto de dos muestras:

A: 2, 5, 1, 9, 12, 1, 5, 5

B: 5, 3, 5, 4, 5, 7, 6, 5

El promedio en ambos casos es el mismo, 5, pero resulta evidente que las muestras son distintas.

Lo que las hace diferentes es la dispersión de los valores individuales alrededor del promedio. Si los resultados de las muestras indican, por ejemplo, los lugares que ocupa un atleta en una competencia, se ve que el atleta B es mucho más consistente que A. El atleta A es muy irregular.

Sin embargo, el atleta A recibe 3 premios (dos por el primer lugar y uno por el segundo lugar) mientras que el atleta B recibe solamente 1 premio (por el segundo lugar). En algunos aspectos de la vida la consistencia es una cualidad deseable; en otros no. La discusión previa tiene como finalidad el indicar que la dispersión es una característica importante de un conjunto de cantidades.

Para cuantificar la dispersión se define la desviación [d] como:

$$d_j = (x_j - \bar{x})$$

Sin embargo, cada valor del conjunto puede ser mayor o menor que el promedio, y por ello resulta que la suma de las desviaciones se hace cero.

$$\sum_{j=1}^n d_j = 0$$

El lector puede confirmar este resultado con los datos de A y de B. Esto no es sorprendente, pues unas desviaciones son positivas y otras son negativas.

Para evitar los problemas de manejar cantidades con signos opuestos, resulta conveniente elevar al cuadrado cada desviación. De esta manera resultan exclusivamente cifras positivas, aunque las unidades resultantes serían el cuadrado de las unidades de los datos originales. Para que las

unidades coincidan, se tomaría la raíz cuadrada de las desviaciones. Se puede definir entonces a la desviación típica de la muestra, s_x como:

$$s_x \equiv \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Se debe observar que el término dentro del radical se parece mucho al promedio del cuadrado de las desviaciones, excepto que el denominador es $(n-1)$ en lugar de (n) . Para explicar esta aparente inconsistencia conviene recordar que los parámetros de una muestra se usan para dar una estimación de los parámetros de la población. Cuando se profundiza en la teoría estadística se comprueba que el mejor estimador de la dispersión de la población se obtiene al dividir entre $(n-1)$ en lugar de hacerlo entre n^* .

Considere nuevamente las muestras A y B:

A: 2, 5, 1, 9, 12, 1, 5, 5

B: 5, 3, 5, 4, 5, 7, 6, 5

Ya se ha dicho que ambas tienen el mismo promedio, pero se aprecia que la dispersión de A es mayor que la dispersión de B. Esta observación es totalmente empírica, pero puede cuantificarse gracias a la desviación típica de cada muestra. Antes se colocará a las muestras en orden creciente para exhibir más claramente la dispersión en cada una.

A: 1, 1, 2, 5, 5, 5, 9, 12

B: 3, 4, 5, 5, 5, 5, 6, 7

* Se puede hallar una discusión convincente en: "Probability and statistics for engineers". 2nd. Ed. de S. Miller y J. E. Freund, Ed. Prentice Hall, 1977, p. 151 o bien en "Fundamental statistical concepts", de F. E. Fischer, Confield Press, p. 231.

Cuando se realiza el cálculo resulta: $s_A = 3.8914$; $s_B = 1.1952$.

Para finalizar esta sección, puede observarse que conforme la muestra se hace más numerosa el valor $(n-1)$ se acerca más al valor lógico de n .

También es digno de mención que una medida de tendencia central, como el promedio, es tan buen representante de un conjunto de cantidades como pequeño resulte el valor de la medida de dispersión, la desviación típica.

LA INCERTIDUMBRE DE LAS MEDIDAS DIRECTAS.

El promedio de un conjunto de cantidades es un estimador del promedio de la población. Entre menor es la dispersión en el conjunto de cantidades (la muestra) más representativo es el promedio de la muestra.

Sin embargo, si se extrae otra muestra de la misma población y se calcula su promedio, se observa en general que difiere del promedio de la primera muestra. Algo similar se puede decir de la desviación típica.

Aunque se espera que los valores de los promedios sean distintos, se puede verificar que la diferencia entre los promedios de las muestras es mucho menor que la diferencia que hay entre los valores individuales.

Podría entonces parecer razonable tomar un conjunto de muestras, obtener sus promedios y con el valor resultante estimar más fielmente al promedio de la población, el valor verdadero de la cantidad de interés.

Para conocer qué tan representativo es cada promedio del conjunto de muestras se puede calcular la desviación típica de los promedios.

Desafortunadamente, el procedimiento de tomar un gran número de muestras es poco conveniente desde el punto de vista económico, pues resulta ser un proceso largo (y largo es sinónimo de caro cuando se habla de la experimentación).

Lo ideal sería obtener una muestra representativa, calcular su promedio y predecir qué tan cerca de este promedio se encuentra el promedio de la población (el valor verdadero).

Esto resultaría muy conveniente, pues se requeriría solamente de una muestra.

Si la población (y la muestra) tienen causas aleatorias de error que se distribuyen en forma normal (que cumplen con la distribución de Gauss) se puede demostrar* que la desviación típica del promedio de una muestra de n cantidades x_1, x_2, \dots, x_n es Δ_x .

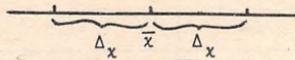
$$\Delta_x \equiv \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}{(n)(n-1)}} \equiv \frac{s_x}{\sqrt{n}}$$

El valor Δ_x indica la diferencia máxima que hay entre el promedio de la muestra (el estimador) y el promedio de la población (el valor real).

*Una demostración que no es totalmente rigurosa pero que es intuitivamente clara se puede ver en: "Statistical treatment of experimental data", de H. D. Young, Mc Graw-Hill, pp 92-96.

Una deducción más formal se puede hallar en "An introduction to scientific research" de E.B. Wilson Jr. Mc Graw-Hill, pp. 252-253.

La desviación típica del promedio se llama usualmente la incertidumbre del promedio, ya que se genera un intervalo de incertidumbre, con centro en el promedio y con radio igual a $\Delta_{\bar{x}}$



El término "incertidumbre" es el adecuado, pues la teoría estadística afirma que el promedio de la población (el valor verdadero) yace en algún lugar dentro del intervalo $\bar{x} + \Delta_x^*$.

Resulta evidente que entre menor sea la incertidumbre Δ_x más fielmente se estimará al valor verdadero con el promedio de la muestra.

Como se ha mencionado en la introducción, el valor de la incertidumbre depende de las fluctuaciones aleatorias: a mayor aleatoriedad, mayor dispersión y mayor intervalo de incertidumbre.

Con el fin de aclarar los conceptos anteriores, considere el ejemplo que sigue.

Ejemplo 1: En el laboratorio de termodinámica se examina un sistema hidráulico en el que se mide la diferencia en el valor de la presión entre dos puntos: A y B. Se mide también el diámetro interior de la tubería

* Como no es posible saber la diferencia entre el valor verdadero y el estimador, la denominación de "error aleatorio" para Δ_x es completamente incorrecta.

en el punto respectivo. Los resultados de estas medidas directas se presentan en la tabla I.

D_A cm	D_B cm	$(p_A - p_B)$ kPa
2.7056	2.069	5
2.7056	2.054	8
2.7182	2.133	5
2.7149		6
		5

TABLA I

Calcule el valor promedio de cada magnitud y la incertidumbre respectiva.

SOLUCION:

Las lecturas que se hacen son independientes entre sí. El que su número sea diferente no tiene importancia en el cálculo

$$\bar{D}_A = \frac{\sum_{j=1}^{n=4} D_{A_j}}{n} = \frac{(2.7056 + 2.7056 + 2.7182 + 2.7149) \text{ cm}}{4} = 2.7111 \text{ cm}$$

$$\Delta_{D_A} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n=4} (D_{A_j} - \bar{D}_A)^2}{(n)(n-1)}}$$

$$\Delta_{D_A} = \sqrt{\frac{(2.7056-2.7111)^2 \text{ cm}^2 + (2.7056-2.7111)^2 \text{ cm}^2 + (2.7182-2.7111)^2 \text{ cm}^2 + (2.7149-2.7111)^2 \text{ cm}^2}{(4)(4-1)}}$$

$$\Delta_{D_A} = 0.0032 \text{ cm} = 3.232 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

Para el cálculo de la incertidumbre es posible calcular primero la desviación típica de la muestra:

$$s_{DA} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n=4} (D_{Aj} - \bar{D}_A)^2}{(n-1)}}$$

$$s_{DA} = \sqrt{\frac{(2.7056 - 2.7111)^2 (\text{cm}^2) + (2.7056 - 2.7111)^2 (\text{cm}^2) + (2.7182 - 2.7111)^2 (\text{cm}^2) + (2.7149 - 2.7111)^2 (\text{cm}^2)}{(4-1)}}$$

$$s_{DA} = 0.0065 (\text{cm}) = 6.4639 \times 10^{-3} (\text{cm}) \therefore \Delta_{DA} = \frac{s_{DA}}{\sqrt{n}} = 3.2320 \times 10^{-3} (\text{cm}) = 0.0032 (\text{cm})$$

$$D_A = \bar{D}_A \pm \Delta_{DA} = 2.7111 (\text{cm}) + 0.0032 (\text{cm})$$

En la actualidad hay un gran número de calculadoras de bolsillo que calculan el promedio aritmético (\bar{x}) y la desviación típica de la muestra (s_x), por lo que el cálculo del promedio y la incertidumbre resulta rápido y sencillo.

Para las otras variables:

$$D_B = 2.0853 (\text{cm}) \pm 0.0242 (\text{cm}) = 2.0853 (\text{cm}) + 2.4223 \times 10^{-2} (\text{cm})$$

$$(P_A - P_B) = 5.8 (\text{kPa}) \pm 0.5831 (\text{kPa})$$

LA INCERTIDUMBRE DE LAS MEDIDAS INDIRECTAS.

Según se ha establecido en la introducción, las medidas indirectas se obtienen relacionando a las medidas directas mediante una ecuación.

Si las medidas directas tienen una incertidumbre, resulta lógico suponer que la medida indirecta tendrá también una incertidumbre y que este valor dependerá de la incertidumbre de los factores que intervienen en el cálculo.

La ecuación que relaciona a la incertidumbre de los factores (digamos las medidas directas) con la incertidumbre de la medida indirecta se debe a S. J. Kline y a F. A. Mc Clintock^Δ.

La deducción formal de esta relación rebasa los objetivos de este trabajo, pero el lector interesado puede hallar una deducción intuitivamente lógica en "Statistical Treatment of Experimental Data" de H. D. Young, Mc.Graw-Hill, pp 46 a 101.

Si se desea conocer la incertidumbre de una variable Z que es función de las variables V, W, X, Y, etc, se emplea la ecuación de Kline y Mc Clintock:

$$\Delta z \equiv \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial V}\right)^2_{W,X,Y} (\Delta V)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial W}\right)^2_{V,X,Y} (\Delta W)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)^2_{V,W,Y} (\Delta X)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)^2_{V,W,X} (\Delta Y)^2 + \dots}$$

El valor promedio de la variable Z se obtiene al sustituir en la función adecuada los valores promedio de las variables V, W, X, Y.

La aplicación de estas relaciones se ilustra con el ejemplo que sigue.

Ejemplo 2: El objetivo de la práctica del ejemplo uno es el cálculo del gasto másico del fluido que circula por el sistema hidráulico (\dot{m}_A).

La relación que liga a esta variable con las medidas directas es:

$$\dot{m}_A = \frac{\pi D_A^2}{4} \sqrt{\frac{2 \rho (P_A - P_B)}{\left(\frac{D_A}{D_B}\right)^4 - 1}}$$

De una práctica precedente se sabe que $\rho = 998 \text{ (kg/m}^3\text{)} + 79.84 \text{ (kg/m}^3\text{)}$.

^Δ Se puede encontrar la deducción de una expresión equivalente en "An introduction to scientific research" de E.B. Wilson Jr. Mc. Graw-Hill, pp. 272-274. Esta expresión se presentó en 1952 en este libro y la de Kline y Mc. Clintock se publicó en 1953.

Solución:

Del ejemplo 1 se tiene: $DA = 2.7111 \text{ (cm)} + 3.232 \times 10^{-3} \text{ (cm)}$

$DB = 2.0853 \text{ (cm)} + 2.4223 \times 10^{-2} \text{ (cm)}$

$(P_A - P_B) = 5.8 \text{ (kPa)} + 0.5831 \text{ (kPa)}$

$\rho = 998 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) + 79.84 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

$$\dot{m}_A = \frac{\pi D_A^2}{4} \sqrt{\frac{2 \bar{\rho} (P_A - P_B)}{[(D_A/D_B)^4 - 1]}}$$

$$= \frac{\pi (2.7111 \times 10^{-2})^2 (\text{m}^2)}{4} \sqrt{\frac{2 (998) (\text{kg/m}^3) (5.8 \times 10^3) (\text{kg/ms}^2)}{\left[\left(\frac{2.7111 (\text{cm})}{2.0853 (\text{cm})}\right)^4 - 1\right]}}$$

$$= 5.7723 \times 10^{-4} (\text{m}^2) \sqrt{6.2356 \times 10^6 \left(\frac{\text{kg}^2}{\text{m}^4 \text{s}^2}\right)}$$

$$= 5.7723 \times 10^{-4} (\text{m}^2) (2.4971 \times 10^3) \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}\right)$$

$$\dot{m}_A = 1.4414 \text{ (kg/s)}$$

Para el cálculo de la incertidumbre se emplea la fórmula de Kline y Mc Clintock:

$$\Delta \dot{m}_A \equiv \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}_A}{\partial D_A}\right)^2 \Delta D_A^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_A}{\partial D_B}\right)^2 \Delta D_B^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_A}{\partial \rho}\right)^2 \Delta^2 \rho + \left(\frac{\partial \dot{m}_A}{\partial (P_A - P_B)}\right)^2 \Delta^2 (P_A - P_B)}$$

Para ganar en claridad de la escritura se omiten las variables que se mantienen constantes en las derivadas parciales.

El lector debe verificar que los resultados de la derivación parcial son:

$$\frac{\partial \dot{m}_A}{\partial D_A} = - \frac{2 D_B^4 \dot{m}_A}{D_A (D_A^4 - D_B^4)}$$

$$\frac{\partial \dot{m}_A}{\partial D_B} = \frac{2 D_A^4 \dot{m}_A}{D_B (D_A^4 - D_B^4)}$$

$$\frac{\partial \dot{m}_A}{\partial \rho} = \frac{\dot{m}_A}{Z\rho}$$

$$\frac{\partial \dot{m}_A}{\partial (P_A - P_B)} = \frac{\dot{m}_A}{2(P_A - P_B)}$$

La expresión resultante es:

$$\Delta \dot{m}_A \equiv \dot{m}_A \sqrt{\frac{4 D_B^8}{(D_A^4 - D_B^4)^2} \left(\frac{\Delta D_A}{D_A}\right)^2 + \frac{4 D_A^8}{(D_A^4 - D_B^4)^2} \left(\frac{\Delta D_B}{D_B}\right)^2 + 4 \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta (P_A - P_B)}{(P_A - P_B)}\right)^2}$$

La sustitución de cada valor haría que la expresión resultara demasiado larga, pero se puede comprobar que:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{m}_A &= \sqrt{1.6485 \times 10^{-6} + 1.2775 \times 10^{-3} + 1.6 \times 10^{-3} + 2.5268 \times 10^{-2}} (1.4414 \text{ kg/s}) \\ &= 7.3525 \times 10^{-2} (1.4414 \text{ kg/s}) \end{aligned}$$

$$\Delta \dot{m}_A = 1.0598 \times 10^{-1} \text{ kg/s} = 0.1060 \text{ kg/s}$$

$$\text{Entonces: } \dot{m}_A = 1.4414 \text{ kg/s} \pm 0.1060 \text{ kg/s}$$

La ecuación de Kline y McClintock es la expresión general que permite el cálculo de la incertidumbre de las medidas indirectas.

Sin embargo, a veces resulta conveniente el empleo de los resultados de la ecuación general en lugar de el uso directo de ésta.

En el caso de los cálculos físicos, las leyes se expresan como sumas, restas, multiplicaciones, divisiones o a la elevación a potencias de las variables.

Cuando se aplica la ecuación general a estas operaciones resultan expresiones compactas que son muy fáciles de recordar.

A continuación se listan los resultados generales.

i) Sumas y restas

Si la variable Z se relaciona con U y con V según

$$Z = U + V$$

y las variables U y V tienen las incertidumbres ΔU y ΔV respectivamente, entonces la incertidumbre de la suma es:

$$\Delta z = \sqrt{(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2}$$

Si la variable Z se relaciona con W y X según

$$Z = W - X$$

y las variables W y X tienen las incertidumbres ΔW y ΔX , respectivamente, entonces la incertidumbre de la resta es:

$$\Delta z = \sqrt{(\Delta w)^2 + (\Delta x)^2}$$

ii) Multiplicaciones y divisiones

Si la variable Z se relaciona con U y con V según:

$$Z = U \cdot V$$

y las variables U y V tienen las incertidumbres Δu y Δv , respectivamente, entonces la incertidumbre del producto es:

$$\Delta_z = \bar{Z} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta u}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{V}\right)^2}$$

en donde \bar{Z} se obtiene de multiplicar \bar{U} y \bar{V} . Debe tenerse presente que las variables se expresan según:

$$U = \bar{U} + \Delta u$$

y

$$V = \bar{V} + \Delta v$$

Si la variable Z se relaciona con W y con X según:

$$Z = \frac{W}{X}$$

y las variables W y X tienen las incertidumbres ΔW y ΔX , respectivamente, entonces la incertidumbre del cociente es:

$$\Delta_z = \bar{Z} \sqrt{\left(\frac{\Delta W}{W}\right)^2 + \left(\frac{\Delta X}{X}\right)^2}$$

en donde \bar{Z} se obtiene al dividir \bar{W} entre \bar{X} . Debe tenerse presente que estas variables se expresan según:

$$W = \bar{W} + \Delta W$$

y

$$X = \bar{X} + \Delta X$$

iii) Multiplicación y división de términos elevados a una potencia

Si la variable Z se relaciona con U y con V según:

$$Z = U^a \cdot V^b$$

en donde a y b son constantes y las variables U y V tienen las incertidumbres Δu y Δv , respectivamente. Entonces, la incertidumbre resultante es:

$$\Delta_z = \bar{Z} \sqrt{\left(\frac{a \Delta u}{U}\right)^2 + \left(\frac{b \Delta v}{V}\right)^2}$$

en donde \bar{Z} se obtiene al operar con los factores \bar{U} y \bar{V} . Debe tenerse presente que estas variables se expresan según:

$$U = \bar{U} + \Delta u$$

y

$$V = \bar{V} + \Delta v \quad \therefore$$

$$\bar{Z} = \bar{U}^a \bar{V}^b$$

Si la variable Z se relaciona con W y con X según:

$$Z = W^c / X^d$$

en donde c y d son constantes y las variables W y X tienen las incertidumbres Δw y Δx , respectivamente. Entonces la incertidumbre resultante es:

$$\Delta z = Z \sqrt{\left(\frac{c \Delta w}{W}\right)^2 + \left(\frac{d \Delta x}{X}\right)^2}$$

en donde Z se obtiene al operar con los factores W y X . Debe tenerse presente que estas variables se expresan según:

$$w = \bar{w} + \Delta w$$

y

$$x = \bar{x} + \Delta x \quad \therefore$$

$$Z = \frac{\bar{w}^c}{\bar{x}^d}$$

EJEMPLO 3. Deduzca la incertidumbre de Z si $Z = w^c/x^d$. Los factores y los exponentes se han definido en (iii).

SOLUCION:

De acuerdo a la ecuación de Kline y McClintock;

$$\Delta z = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial w}\right)^2 (\Delta w)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x}\right)^2 (\Delta x)^2}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial w} = c \frac{w^{c-1}}{x^d} = \frac{c}{w} \cdot \frac{1}{x^d}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = -d \frac{w^c}{x^{d+1}} = -d \frac{w^c}{x} \cdot \frac{1}{x}$$

$$\Delta z = \sqrt{\left(\frac{c}{w}\right)^2 \left(\frac{w^c}{x^d}\right)^2 (\Delta w)^2 + \left(\frac{-d}{x}\right)^2 \left(\frac{w^c}{x^d}\right)^2 (\Delta x)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{w^c}{x^d}\right)^2 \left[\left(\frac{c \Delta w}{w}\right)^2 + \left(\frac{-d \Delta x}{x}\right)^2 \right]}$$

$$= \left(\frac{w^c}{x^d}\right) \sqrt{\left(\frac{c \Delta w}{w}\right)^2 + \left(\frac{-d \Delta x}{x}\right)^2}$$

$$\Delta z = Z \sqrt{\left(\frac{c \Delta w}{w}\right)^2 + \left(\frac{d \Delta x}{x}\right)^2}$$

Las otras comprobaciones son también bastante sencillas y se le recomienda al lector que las haga.

El análisis de la propagación de la incertidumbre permite establecer las variables que contribuyen en mayor parte a la incertidumbre del resultado final.

En el ejemplo 2 se observa que la variable más importante en este aspecto es la diferencia de presiones. (Véase su contribución dentro del radical: 2.5268×10^{-3}). Si se desea mejorar la precisión del experimento será aconsejable mejorar las condiciones de la medida de esta variable. Se podrá conseguir un aparato con una resolución mejor o un instrumento más sensible pero lograr este objetivo.

El análisis de la propagación de incertidumbre podría hacer que un experimentador se inclinara por una técnica de medida por encima de otras similares en las que la incertidumbre del resultado fuera más grande.

En la literatura se encuentran varias aplicaciones de estas ideas. (4)

REGRESION LINEAL

Cuando se desea establecer que dos variables se hallan relacionadas normalmente se procura encontrar la ecuación matemática que las liga y que representa mejor esta relación.

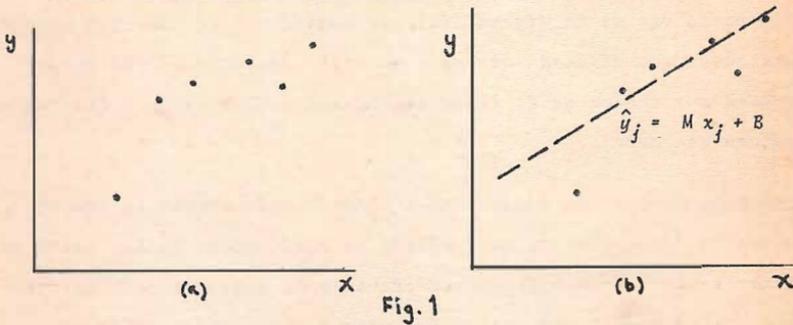
Como el número de relaciones matemáticas que puede existir es prácticamente ilimitado, lo que se hace comúnmente es representar los puntos experimentales en un plano coordenado adecuado para observar el tipo de relación (si existe) entre las variables.

Dado que la única línea que se puede reconocer a simple vista es una línea recta, la manera de proceder es la de modificar a una o a las dos variables hasta que los puntos de la gráfica se agrupen "alrededor"

(4) Véase por ejemplo "Métodos experimentales para ingenieros" de J.P. Holman, 3a. edición, Mc Graw-Hill, pp. 45 a 51.

de una recta. (2)

Cuando se consigue que los puntos parezcan una línea recta, el paso que sigue es el "ajuste" de una línea recta que "represente" lo más fielmente posible el comportamiento de los datos:



La "mejor recta" que se puede trazar a partir de los datos (una serie de parejas (x, y)) se llama la línea de la regresión.

En la fig. 1 (a) se representan los puntos experimentales que a simple vista parecen tender a agruparse linealmente. En la figura 1(b) se ha trazado con una línea discontinua una recta que se "ajusta" razonablemente bien a los valores experimentales.

Sin embargo, cada experimentador podría trazar "su" mejor línea para un conjunto experimental dado y se podrían tener entonces muchas rectas que representan "mejor" los valores del experimento.

Afortunadamente existe un método objetivo que permite trazar una única recta para cada conjunto de valores experimentales: $\hat{y}_j = Mx_j + B$

Es razonable considerar que la mejor línea es aquella que pasa lo más cerca posible de todos y cada uno de los puntos experimentales.

(2) Vea en la misma obra las pp. 79 a 81.

El criterio de ajuste reside entonces en encontrar la línea (es decir, los parámetros M y B , la pendiente y el intercepto) que minimizan la diferencia entre el valor experimental (y_j) y el valor de la correlación (\hat{y}) para un valor dado de la abscisa, x_j .

Como se puede ver de la figura 1(b), se podría dar el caso que la suma algebraica de las diferencias ($d_j = y_j - \hat{y}$) cancelara si los puntos - que quedan por encima de la línea resultaran equivalentes a los puntos que quedan por debajo.

Debe recordarse que una dificultad similar surgía cuando se trataba de valorar la dispersión de un conjunto de cantidades. En ese caso, el problema se resolvió sencillamente elevando al cuadrado cada una de las desviaciones para manejar exclusivamente magnitudes positivas.

En este caso se va a proceder en una forma análoga. La condición del mejor ajuste será la de aquella línea ($\hat{y} = Mx + B$) que haga mínima la suma de los cuadrados de las desviaciones:

$$\sum_{j=1}^n (d_j)^2 = \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y})^2$$

Para un conjunto de valores experimentales ya dado: $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ las únicas variables son la pendiente (M) y el intercepto (B) de la línea de la correlación.

Si se denomina a la suma del cuadrado de las desviaciones C_R :

$$C_R = \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y})^2.$$

Cuando se sustituye la ordenada de la correlación (\hat{y}) por la ecuación de la recta ($Mx_j + B$) resulta

$$C_R = \sum_{j=1}^n (y_j - Mx_j - B)^2$$

Las condiciones para obtener el mínimo de esta función son:

$$\left(\frac{\partial C_R}{\partial M}\right)_B = 0$$

$$\left(\frac{\partial C_R}{\partial B}\right)_M = 0$$

Aprovechando que la derivada de una suma es igual a la suma de las derivadas:

$$\left(\frac{\partial C_R}{\partial M}\right)_B = -2 \left[\sum x_j y_j - \sum M x_j^2 - \sum B x_j \right] = 0$$

$$\left(\frac{\partial C_R}{\partial B}\right)_M = -2 \left[\sum y_j - \sum M x_j - \sum B \right] = 0$$

Los parámetros M y B son los mismos para cada valor de x_j o de y_j , es decir, son únicos para el conjunto de valores experimentales. Por ello, pueden extraerse del símbolo de suma.

Como todas las sumas van desde $j = 1$ hasta $j = n$ se han suprimido los límites en el símbolo de suma, quedando:

$$\sum x_j y_j - M \sum x_j^2 - B \sum x_j = 0$$

$$\sum y_j - M \sum x_j - B \cdot n = 0$$

Estas ecuaciones se llaman normales. Cuando se resuelven para las incógnitas M (la pendiente) y B (la ordenada al origen) resulta:

$$M = \frac{n (\sum x_j y_j) - (\sum x_j) (\sum y_j)}{n (\sum x_j^2) - (\sum x_j)^2}$$

$$B = \frac{(\sum y_j) - M (\sum x_j)}{n}$$

El método que se ha seguido se basa en minimizar la suma del cuadrado de las desviaciones. Por ello se le llama el método del mínimo de los cuadrados.

Ejemplo 4.

En el laboratorio se mide la temperatura de saturación del agua a distintos valores de la presión: Se tienen los siguientes resultados:

T(°C)	81,	82,	84,	89,	92
P(kPa)	48,	50,	58,	71,	75

La ecuación que liga a estas variables es:

$$\ln P = - \left(\frac{h_{fg}}{R_{H_2O}} \right) \cdot \frac{1}{T} + \left(\frac{h_{fg}}{R_{H_2O} T_0} \right) + \ln P_0$$

$$\ln P = M \cdot \frac{1}{T} + B$$

La constante del agua, R_{H_2O} , es $461.5232 \times 10^{-3} \text{ (J/(gK))}$. Calcule el valor de h_{fg} que resulta del experimento.

SOLUCION

Las variables se deben transformar de P a $\ln P$ y de T a $1/T$. La temperatura se debe transformar primero en la temperatura absoluta.

$$1/T(K) \quad 2.74612 \times 10^{-3}, \quad 2.81571 \times 10^{-3}, \quad 2.79994 \times 10^{-3}, \quad 2.76129 \times 10^{-3}, \\ 2.73860 \times 10^{-3}$$

$$\ln(P) \quad 3.87120, \quad 3.91202, \quad 4.06044, \quad 4.26268, \quad 4.31749$$

Las sumas necesarias son:

$$\begin{aligned}\Sigma(1/T) &= 13.9392 \times 10^{-3} (1/K) \quad \text{equivalente a } \Sigma(x_j) \\ \Sigma(1/T^2) &= 38.8656 \times 10^{-6} (1/K^2) \quad \text{equivalente a } \Sigma(x_j)^2 \\ \Sigma(\ln P) &= 20.4238 \quad \text{equivalente a } \Sigma(y_j) \\ \Sigma((\ln P)/T) &= 56.9095 \times 10^{-3} (1/K) \quad \text{equivalente a } \Sigma(x_j y_j)\end{aligned}$$

La pendiente y el intercepto se valúan según las ecuaciones normales.
En este caso $n = 5$.

$$M = \frac{5(56.9095 \times 10^{-3})(1/K) - [13.9392 \times 10^{-3}](1/K)(20.4238)}{5(38.8656 \times 10^{-6})(1/K^2) - (13.9392 \times 10^{-3})^2(1/K^2)}$$

$$M = -5390.0627(K)$$

$$B = \frac{(20.4238) - (-5390.0627)(K)(13.9392 \times 10^{-3})(1/K)}{5}$$

$$B = 19.1174$$

Según la ecuación, $M = -\frac{h_{fg}}{K_{\text{agua}}} = -5390.0627(K)$

$$\begin{aligned}h_{fg} &= 0.4615232 \left(\frac{J}{gK}\right) (5390.0627)(K) \\ &= 2487.6406 \left(\frac{J}{g}\right)\end{aligned}$$

El experimento tiene como objetivo el cálculo de la entalpia de vaporización a $93(^{\circ}C)$.

De las tablas de propiedades se encuentra que el valor aceptado es $2275.4(J/g)$.

Al comparar el resultado del experimento (h_{fgE}) con el de las tablas (h_{fgT}) se tiene:

$$\frac{(h_{fgE}) - (h_{fgT})}{(h_{fgT})} \times 100 = 9.3276\%$$

que es bastante aceptable.

El método del mínimo de los cuadrados requiere de una gran cantidad de cálculos, como las sumas de las variables, la suma del cuadrado de las variables y la suma del producto de las variables.

Afortunadamente, muchas calculadoras de bolsillo presentan entre sus funciones la "regresión lineal". Por ello, el cálculo de los parámetros de la mejor recta para un conjunto de cantidades se lleva a cabo en la práctica con suma facilidad.

En el ejemplo 4 se presentan los valores de las sumas necesarias, pero esta es una información superflua que la calculadora maneja internamente.

Debe notarse también que la presentación de los resultados intermedios conduce inexorablemente a un error de truncamiento.

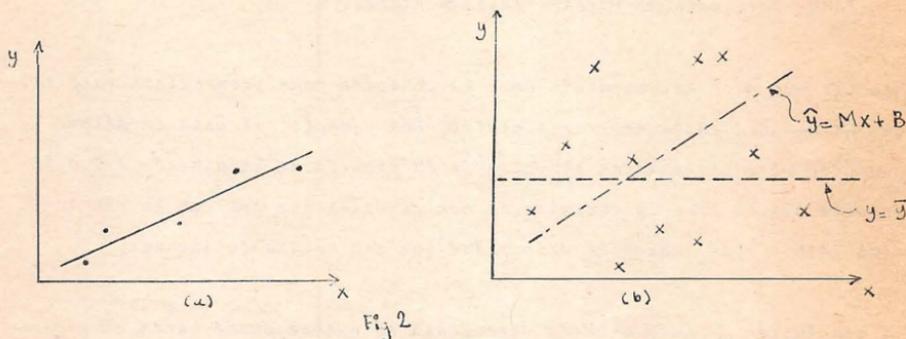
En el mismo ejemplo 4 se han calculado la pendiente (M) y el intercepto (B) con los valores truncados que se han escrito. Los resultados respectivos son - 5390.0627 K y 19.1114.

Cuando se usan los valores de las sumas con todas las cifras que maneja la calculadora, es decir, cuando se alimentan los datos y se permite que la calculadora realice los cálculos hasta el final, los valores de la pendiente (M) y del intercepto (B) son respectivamente - 5423.8986 K y 19.2057.

Gracias al método del mínimo de los cuadrados se puede asociar una línea recta a cualquier conjunto de cantidades.

Se ha dicho antes que el procedimiento normal es el de estudiar la ten-

dencia de los puntos cuando se hace una gráfica de las dos variables. se espera que la línea de la regresión se ajuste razonablemente a los puntos que exhiben un comportamiento "lineal"



como en la figura 2a) y para esta situación la ecuación del modelo $y = Mx + B$ resulta adecuada.

Esta ecuación representa la relación de las variables y se puede usar para estimar un valor de y para cualquier valor de x dentro del intervalo experimental.

Cuando se emplean los datos del ejemplo 4 es posible pronosticar el valor de la presión de saturación que corresponde a la temperatura de 85°C . Obsérvese que esta temperatura no se ha medido experimentalmente, pero queda comprendida en el intervalo experimental.

Al emplear la ecuación resultante de la correlación, $\ln P = M 1/T + B$, se puede comprobar que la presión deseada es 58.0628 kPa .

El valor que aparece en las tablas de propiedades es 57.83 kPa y se apre
cia que concuerda bastante bien con el valor "estimado".

Este poder predictivo debe emplearse cuidadosamente, pues su validez se
limita al intervalo de valores experimentales.

Resulta muy poco recomendable usar la ecuación para pronosticar valores
que salgan del intervalo experimental. Por ejemplo, al usar la misma
ecuación para pronosticar el valor de la presión de saturación a 150 °C
resulta 594.62 kPa. La comparación con el valor que aparece en las ta-
blas (475.8 kPa) indica la disparidad que era razonable suponer.

La conclusión de la discusión precedente es que se puede hacer el pro-
nóstico de una variable dependiente (y) para un valor dado de la varia-
ble independiente (x) cuando se conoce la ecuación que las relaciona

Este pronóstico se hace con cierta confianza, pues la existencia de la
ecuación indica que se dispone de información acerca del comportamien-
to de las variables.

Pero supóngase por un momento que no se conociera la relación entre las
variables del ejemplo 4 y se necesitara pronosticar el valor de una pre-
sión dentro del intervalo experimental.

A falta de mayor información, el valor que se usaría como pronóstico ten
drá que ser el promedio, que es el valor que representa mejor a un conjun
to de cantidades. Al tomar esta elección, el valor de la presión sería
60.4 kPa.

En este caso, este pronóstico resulta menos acertado que el de la correlación, como era de esperarse.

Sin embargo, si los puntos experimentales muestran la tendencia de la figura 2b) parece que los valores que se pronostiquen para Y mediante la correlación no son mejores que el valor que pronostique el promedio, \bar{Y} .

Es decir, no se puede sacar ninguna ventaja del modelo que espera una relación lineal sencillamente porque las magnitudes no varían de esa manera.

En este caso, la desviación de la correlación ($C_R = \sum (y_i - Hx_i - B)^2$) resulta tan grande como la desviación del promedio ($C_P \equiv \sum (y_i - \bar{y})^2$).

En cambio, cuando se tiene la situación de la figura 2a), resulta evidente que C_R es mucho menor que C_P .

Esta observación permite definir un parámetro que indique la ventaja del ajuste lineal por encima del valor promedio:

$$r^2 \equiv 1 - \frac{C_R}{C_P}$$

Si se tiene la situación de la figura 2a) entonces C_R debe ser mucho menor que C_P y por tanto (C_R/C_P) debe ser mucho menor que la unidad, resultando que r^2 sea muy cercano a la unidad.

Si por el contrario se tiene la situación de la figura 2b), entonces C_R es comparable a C_P y por lo tanto (C_R/C_P) debe ser aproximadamente igual a la unidad, resultando que r^2 sea muy cercano a cero.

En las aplicaciones estadísticas se prefiere usar r en lugar de r^2 siendo:

$$r \equiv \sqrt{1 - \frac{C_R}{C_P}}$$

A esta variable se le llama el coeficiente de la correlación.

Se puede comprobar que cuando las desviaciones (C_R y C_P) se substituyen por sus definiciones se llega a

$$r = \frac{n[\sum(x_j y_j)] - (\sum x_j)(\sum y_j)}{\sqrt{[n(\sum x_j^2) - (\sum x_j)^2][n(\sum y_j^2) - (\sum y_j)^2]}}$$

La ventaja de emplear el coeficiente de la correlación (r) en lugar del valor al cuadrado está en que su signo indica la naturaleza de la relación entre las variables.

Si r es positivo ($0 \leq r \leq 1$) señala que a un aumento de la abscisa (x) le corresponde un aumento de la ordenada (y).

Si r es negativo ($-1 \geq r \geq 0$) señala que a un aumento de la abscisa (x) le corresponde una disminución de la ordenada (y).

Si r es cercano a 1 (σ a -1) señala que la relación entre las variables se representa fielmente mediante una función lineal.

De esta manera, aún sin necesidad de representar los puntos experimentales en un plano coordenado, se puede establecer si la relación que los liga es lineal o no, estudiando el valor del coeficiente de correlación.

Si resultara que el coeficiente de correlación desechara la posibilidad

de una relación lineal, se puede cambiar a las variables hasta encontrar algunas que varíaran linealmente.

EJEMPLO 5.

Calcule el coeficiente de la correlación para los datos del ejemplo 4.

SOLUCION:

En el ejemplo 4 aparecen las sumas necesarias para el cálculo del coeficiente de correlación, excepto $\Sigma(y_j^2)$.

Se puede comprobar que

$$\Sigma(\ln P)^2 = 83.5885$$

entonces

$$r = \frac{n(\Sigma x_j y_j) - (\Sigma x_j)(\Sigma y_j)}{\sqrt{[n \Sigma(x_j^2) - (\Sigma x_j)^2][n \Sigma(y_j^2) - (\Sigma y_j)^2]}}$$

$$r = \frac{(5)(56.9095 \times 10^{-3} (1/K) - (13.9392 \times 10^{-3} (1/K) (20.4328))}{\sqrt{[(5)(38.8656 \times 10^{-6} (1/K^2) - (13.9392 \times 10^{-3})^2 (1/K^2))][5(83.5885) - (20.4328)^2]}} \sqrt{2}$$

$$r = - 0.9848$$

El signo negativo indica que si $(1/T)$ aumenta entonces $(\ln P)$ disminuye es decir, se espera que la pendiente sea negativa, como se ha visto que resulta en el ejemplo 4.

El valor de 0.9848, que es bastante cercano a la unidad, indica que las variables muestran naturalmente una tendencia a relacionarse linealmente.

Como en el caso del cálculo de la pendiente y del intercepto, un gran número de calculadoras de bolsillo incluye como una función al coeficiente de la correlación, por lo que el cálculo es normalmente más rápido y sencillo que en el ejemplo 5.

APENDICE C

USO Y CUIDADOS DEL EQUIPO

- . Bomba, platina y campana de vacfo
- . Aparato para la medición del equivalente mecánico de la calorfa.
- . Calorfmetro de vacfo, wathorfmetro y resistencia de inmersión.
- . Parrilla eléctrica de temperatura controlada.
- . Balanza de tres brazos, con platillo.
- . Aparato de Mariotte - Leblanc.
- . Aparato de Clemént - Désormes
- . Generador de vapor.
- . Bomba de agua.
- . Motor de aire caliente (Stirling)

BOMBA, PLATINA Y CAMPANA DE VACIO

BOMBA DE VACIO

Presenta varias características particulares:

Tiene una válvula patentada que mantiene el vacío y evita el regreso del aceite a la instalación cuando la bomba se detiene en condiciones de vacío. Cualquier dispositivo exterior es por tanto inútil.

Se puede emplear como bomba de vacío o como compresor.

El sistema de lubricación y la construcción de la compuerta de salida se concibieron para asegurar un funcionamiento agradablemente silencioso.

No provoca vibraciones.

Un dispositivo de inyección de aire permite que la bomba aspire los valores condensables sin riesgo de contaminación.

El montaje y el desmontaje son sencillos.

La construcción del cárter hace que esta bomba sea el instrumento ideal para la recirculación o la recuperación de los gases.

Un filtro en la entrada purifica el aire que se aspira. La aspiración del aire es silenciosa en todas las condiciones de operación.

Una compuerta de salida permite fijar la presión entre 0.140(kg/cm²) y 1.4(kg/cm²)

Características de operación:

Como compresor (funcionamiento continuo): 1.4(kg/cm²)

Como bomba de vacío:

límite de vacío sin inyección de aire	0.01 torr
límite de vacío con inyección de aire	0.5 torr
capacidad a la velocidad normal(650 t/mm)	35(lto/mm)
capacidad aproximada de absorción del vapor de agua	0.05(kg/h)
Desviaciones	408 x 260 x 237(mm)
Peso:	27(kg)
Alimentación:	127 V.C.A.

PLATINA DE VACIO

Esta formada por una gruesa placa de duraluminio de 320 x 320 mm, montada sobre cuatro patas.

Una serie de juntas concéntricas de caucho permiten el empleo de las campanas de vacfo o de artefactos de diámetros distintos.

El tubo que sale del centro de la placa se conecta a un indicador de vacfo de mercurio, protegido por un grueso tubo de plexiglás.

CAMPANA DE VACIO

Campanas de vidrio con un botón superior y con bordes esmerilados, de 25 cm de diámetro.

APARATO PARA LA MEDICION DEL EQUIVALENTE MECANICO
DE LA CALORIA

APARATO PARA LA MEDIDA DEL EQUIVALENTE MECANICO DE LA CALORIA

Un motor eléctrico hace girar un calorímetro de cobre rojo de paredes gruesas. El motor produce el trabajo necesario para vencer la fuerza de frotamiento que ejerce una cinta de cobre que se enreda alrededor del calorímetro.

El frotamiento entre la cinta y el calorímetro provoca la elevación de la temperatura del calorímetro y de una pequeña cantidad de agua colocada en el interior de este último. Un termómetro permite leer esta elevación de la temperatura.

El número de vueltas que da el calorímetro se lee directamente gracias a un contador situado en la parte inferior del motor.

El aparato permite alcanzar una elevación de temperatura importante en un tiempo muy corto (del orden de 25 s), de tal manera que las pérdidas caloríficas se reducen al mínimo.

OPERACION:

El aparato permite conocer:

- i) El trabajo que hace el motor, que es igual al par que ejerce la pesa tensora multiplicado por el número de vueltas que gira el calorímetro.
- ii) El calor correspondiente a este trabajo. Este calor se calcula conociendo la masa de la cinta de cobre, la masa del calorímetro de cobre, la masa de agua, el cambio de temperatura, las capacidades térmicas específicas del agua y del cobre y el equivalente en agua del termómetro.

El valor del equivalente mecánico de la caloría que se obtiene con este aparato tiene una exactitud del 3%.

El aparato mide 120 x 153 x 670 mm y pesa 9.5 kg.

PRECAUCIONES

- a) Desatornille el calorímetro de cobre de su base de plástico y mida su masa con la báscula, manteniendo el calorímetro en la báscula desplace el indicador de la escala de gramos hacia la derecha para agregar un gramo en la báscula e inmediatamente agregue agua al calorímetro usando una jeringa hipodérmica, hasta que se equilibre la báscula, esto es, cuando se le haya introducido un gramo de agua al calorímetro.
- b) Una vez que se ha vuelto a atornillar al calorímetro en su base de plástico, introduzca el termómetro en los tapones de hule, colocándolos cuidadosamente en sus soportes, de manera que el termómetro quede centrado dentro del calorímetro y que no toque el fondo.
- c) Coloque la rejilla de cobre alrededor del calorímetro, observando que resorte, cordel y pesa estén bien colocados.
- d) Ajuste el contador de vueltas en cero y tome la temperatura inicial del sistema agua calorímetro-rejilla.
- e) Conecte el aparato a la línea y oprima el interruptor del motor hasta que el contador indique que el calorímetro ha dado 600 vueltas aproximadamente.
- f) Tome la lectura de temperatura hasta que el mercurio halla alcanzado su máximo valor.
- g) Desatornille el calorímetro y métalo al chorro de agua junto con la rejilla por un lapso de dos o tres minutos y repita los pasos anteriores de ésta actividad cinco veces más, a fin de llenar la siguiente tabla:

Número de Lecturas	# de Revoluciones	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)
--------------------	-------------------	--------------------------	------------------------

1

2

3

4

5

CALORIMETRO DE VACIO, WATTHORIMETRO Y
RESISTENCIA DE INMERSION

USO DEL CALORIMETRO, RESISTENCIA DE INMERSION Y WATTHORIMETRO

1. Verificar que el watt-horímetro se encuentre calibrado y de ser posible determinar el error típico del factor en joules por vuelta.
2. Secar el vaso del calorímetro después de cada experimento.
3. Verificar que la balanza esté calibrada y limpiarla o secarla cuando sea necesario.
4. Sumergir la resistencia de inmersión en el agua, de manera que la parte metálica no quede al aire.
5. Nunca debe tenerse a la resistencia de inmersión fuera del agua mientras esté conectada.
6. La temperatura final del agua, después del suministro de calor, no debe tomarse inmediatamente, sino observar cuidadosamente el termómetro hasta que haya alcanzado el valor máximo.
7. Introducir el termómetro dentro del agua al nivel especificado por el fabricante.

PARRILLA ELECTRICA DE
TEMPERATURA CONTROLADA

PARRILLA ELECTRICA DE TEMPERATURA CONTROLADA

La parrilla SPA/025B es una parrilla de calentamiento con agitación, diseñada para funciones como una fuente de calentamiento, desde la temperatura ambiente hasta 700 °F (371 °C) y como un agitador, cuya capacidad de agitación va desde 60 hasta 100 r.p.m.

Un control bimetalico mantiene constante la temperatura de la superficie de la parrilla con una variación máxima de ± 5 °F (2.78 °C) a lo largo del rango de operación.

Gracias a un sistema único para la ruptura de vortices se logra un excelente control de la velocidad de agitación, principalmente a bajas velocidades.

Características eléctricas: 120(V), 6.0(A), 725(W) 50/60 (Hz).

Operación:

Tanto el control de temperatura como el de velocidad son una combinación de interruptores "ON-OFF" ("encendido-apagado") y de selectores.

La posición de apagado (OFF) corresponde el extremo en la dirección contraria a las manecillas del reloj.

Para fijar una temperatura se debe girar el control ("HEAT") en la dirección de la manecillas de un reloj hasta llegar al número deseado. Los números corresponden aproximadamente a cientos de grados °F.

Por ejemplo, la posición de 5 corresponde aproximadamente a 500 °F .

Para fijar una velocidad se debe girar el control ("SPEED") en la dirección de las manecillas del reloj hasta que se alcance la agitación que se desea.

PRECAUCION: Nunca use un material aislante en la placa superior, ya que el uso de tal material impide la disipación de calor de la placa y puede provocar su reblandecimiento, o en casos extremos, su fusión.

El modelo funciona exclusivamente a una condición de corriente alterna y a una diferencia de potencial. Verifique los valores adecuados en la placa de especificaciones.

RECALIBRACION DE LA UNIDAD DE CONTROL

A veces resulta necesario recalibrar el control, debido al desgaste de los contactos o como resultado de otras reparaciones a la parrilla.

La recalibración debe hacerse manteniendo tanto a la placa de ca lentamiento como al control a temperatura ambiente. Debe asegurarse que la perilla del control de temperatura está en la posi ción extrema contraria al sentido de las manecillas del reloj. Como verificación, gire el control de temperatura en el sentido de las manecillas del reloj y observe la posición a la que se enciende el letrero "Cycle". Si este punto no está en la primera marca por encima de "OFF" o lo suficientemente cerca, se necesita recalibrar.

Gire hasta el punto en el que se enciende el letrero "Cycle", afloje el tornillo que sujeta la perilla, gire la perilla muy cuidadosamente hasta que la marca apunte a la primera graduación encima de "OFF". (Asegúrese que el eje no gira cuando se gira la perilla). Apriete el tornillo que sujeta a la perilla y gire ésta por completo en la dirección contraria a la de las ma necillas del reloj.

Deje la parrilla apagada unos instantes para asegurarse que no se ha desprendido calor al ajustar la perilla.

Gire la perilla en el sentido horario y observe la posición a la que se enciende el letrero "Cycle". Si se satisfacen las con diciones citadas anteriormente, la calibración está lista. Si no, siga nuevamente las instrucciones precedentes.

BALANZA DE TRES BRAZOS,
CON PLATILLO

BALANZA DE TRES BRAZOS, CON UN PLATILLO

La báscula tiene un amortiguador magnético; es insensible a las condiciones de alineamiento (es decir, puede funcionar en superficies inclinadas).

La capacidad de la balanza puede aumentar desde 610 g hasta 2610 g con la adición de un juego de pesas.

El platillo de acero inoxidable tiene un diámetro de 15 cm

Capacidad	sin pesas	610 g
	con pesas	2610 g

Resolución	0.1 g
------------	-------

Calibraciones:

brazo del frente	10 g	x 0.01 g
brazo central	500 g	x 100 g
brazo posterior	100 g	x 10 g

APARATO DE MARIOTTE - LEBLANC

APARATO DE MARIOTTE-LEBLANC

El aparato consta de un riel de Aluminio graduado en centímetros y soportado por una base de hierro fundido. A cada lado del riel se colocan unas ampolletas de vidrio montadas en un carro metálico, el cuál, se fija a la parte trasera del riel mediante una palanca, que actúa con la ayuda de un resorte. Las dos ampolletas se encuentran unidas por su parte inferior mediante una manguera de plástico, que contiene mercurio.

Una de las ampolletas está graduada (en cm^3) y en la parte superior posee una abrazadera que tiene como finalidad evitar la salida del aire cuando éste es comprimido por el mercurio. La otra ampolleta no tiene graduación y se encuentra abierta a la atmósfera.

Su función es desplazar el mercurio hacia la ampolleta graduada para comprimir el aire que ahí se encuentra, esto se realiza, moviendo la ampolleta (no graduada) a lo largo del riel.

CARACTERISTICAS:

Rango de la escala metálica:	0 - 140 cm
Resolución de la escala metálica:	0.1 cm
Rango de la ampolleta:	0 - 40 cm^3
Resolución de la ampolleta:	0.2 cm^3

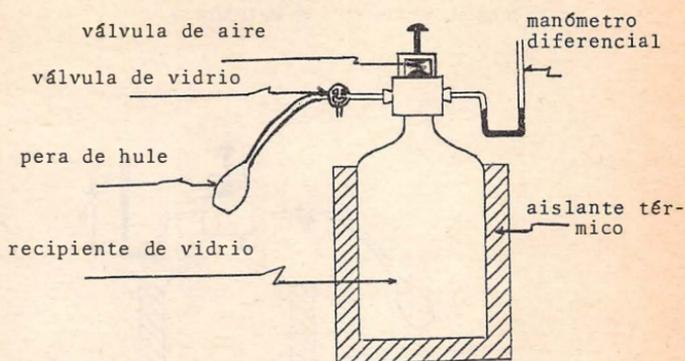
PRECAUCIONES:

Verificar que exista la cantidad adecuada de mercurio para realizar el experimento.

Asegurarse que las palancas presionadoras se encuentren en posición inclinada para que sujeten perfectamente las ampolletas. Para el transporte del dispositivo, debe tomarse del riel de aluminio.

APARATO DE CLEMENT - DESORMES

APARATO DE CLEMENT-DESORMES



- El recipiente de vidrio contendrá el aire con el cual se realiza el experimento y el aislamiento que rodea a dicho recipiente es para evitar que la transmisión de calor al ambiente sea rápida.
- La válvula de hule que se encuentra en la parte superior del Aparato, permite la salida del aire encerrado en el recipiente en forma rápida.
- La válvula de vidrio es de tres pasos, en una posición evita todo flujo de aire en cualquier sentido, en la posición media, permite que el flujo de aire que se bombea con la pera de hule, entre al recipiente de vidrio, y en la última posición, da salida al aire encerrado en el recipiente.
- La pera, tiene una válvula check en su parte inferior con el fin de que el flujo de aire sea únicamente del medio ambiente hacia el recipiente.
- El manómetro diferencial graduado, con petróleo como fluido manométrico, indica la diferencia de Presión del aire contenido en el aparato con la presión atmosférica.
- Una vez comprendido el funcionamiento del Aparato, se abre la válvula de hule durante uno o dos minutos, con el fin de que la presión del aire dentro del recipiente sea igual a la presión atmosférica, de manera que el manómetro no indique ninguna diferencia de altu-

ras. Una vez cerrada la válvula de hule, se mueve la válvula de vidrio a su posición intermedia para bombear aire con la pera al interior del recipiente ocasionando un aumento de presión que se detecta en el manómetro al elevarse la columna a una altura h como se muestra en la figura 2.

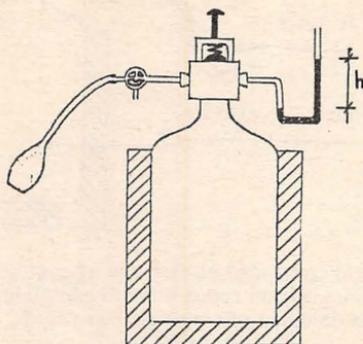


Fig. 2. El recipiente contiene aire a una presión mayor que la atmosférica.

El proceso adiabático, se efectúa al abrir y cerrar la válvula de hule rápidamente ($1/25$ de segundo), escapando parte del aire encerrado en el recipiente. Durante la expansión adiabática la presión del aire disminuye hasta la presión atmosférica y su temperatura es menor que la temperatura ambiente. Sin embargo, el proceso es tan rápido que no se pueden medir las propiedades P , V , T iniciales y finales para analizar el proceso de expansión adiabática, por lo que se hace necesario un estudio de los procesos efectuados y que a continuación se establecen:

El estado inicial del aire en el recipiente es de equilibrio termodinámico con el ambiente, como lo muestra la figura 3. En estas condiciones especificamos que el aire se encuentra en el estado 1.

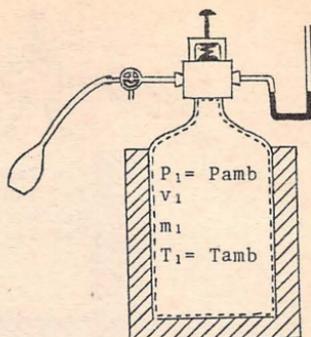


Fig. 3 Estado inicial del aire.

Suministrando aire al recipiente, la presión aumenta al igual que la temperatura y la masa de control se desplaza al comprimirse el aire, se dejan transcurrir dos o tres minutos para que se alcance el equilibrio térmico del sistema con el medio ambiente, por otra parte, a causa de la transmisión de calor, disminuye ligeramente la presión en el sistema y se define el estado 2 del aire como se indica en la figura 4, donde se observa una diferencia de alturas h_2 en el manómetro.

A continuación se abre y cierra la válvula de hule rápidamente, efectuándose el proceso adiabático en una fracción de segundo, durante este proceso, la presión y temperatura disminuyen, expandiéndose la frontera de la masa de control.

En la figura 5 se define el estado 3, que se tiene al finalizar el proceso adiabático.

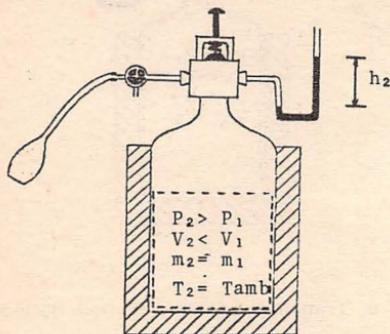


Fig. 4

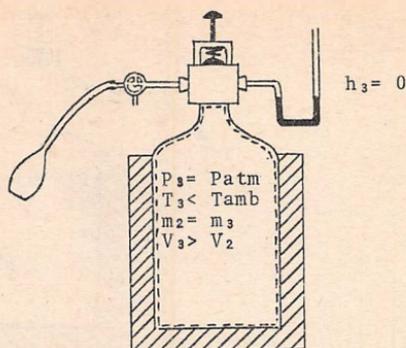


Figura 5 Estado final del aire después de la expansión.

Después de dos o tres minutos, el ambiente le trasmite calor al sistema hasta que, nuevamente, alcanza el equilibrio térmico, en consecuencia, la presión del aire aumenta produciéndose una diferencia de alturas h_4 , como se indica en la figura 6, en donde se define el estado 4.

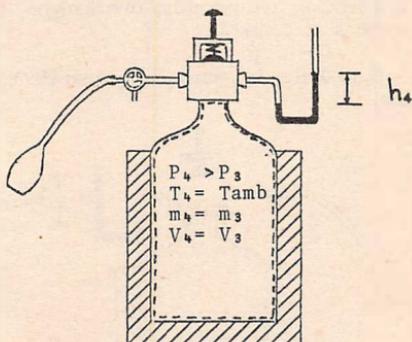


Fig. 6 Transferencia de calor que define el estado 4.

GENERADOR DE VAPOR

GENERADOR DE VAPOR

Este equipo es un calentador de gas que fué acondicionado para generar vapor como máximo hasta 6 kg/cm^2 . Tiene una válvula de seguridad que abre cuando la presión excede ligeramente de los 6 kg/cm^2 .

El generador ha sido instrumentado con manómetros de bourdon y termómetros bimetalicos, colocados ambos en lugares donde se desea conocer el valor de estas propiedades termodinámicas. Asimismo cuenta con válvulas de aguja para estrangular el vapor y, orificios en la tubería de descarga para insertar termómetros de mercurio.

El suministro de gas al calentador se hace mediante una manguera de plástico (de una de las mesas del laboratorio al calentador). Esta conexión cuenta con 2 válvulas de aguja, de los cuales una controla al quemador y otra al piloto.

DATOS TECNICOS

DEL GENERADOR:

Capacidad	40 litros
Tipo de gas	LP
Presión de trabajo	$6.5 \text{ kg/cm}^2 = 6.37 \text{ bar}$
Eficiencia mínima total	65%

DE LOS MANOMETROS:

Rango	$0 \rightarrow 11 \text{ kg/cm}^2$	Resolución	0.1 kg/cm^2
	$0 \rightarrow 10.787 \text{ bar}$		2 psi
	$0 \rightarrow 161.7 \text{ psi}$		

DE LOS TERMOMETROS BIMETALICOS:

Rango	$0 \rightarrow 250^\circ\text{C}$	Resolución	5°C
-------	-----------------------------------	------------	-------------------

DE LOS TERMOMETROS DE MERCURIO

Rango	$-10 \rightarrow 150^\circ\text{C}$	Resolución	1°C
-------	-------------------------------------	------------	-------------------

PRECAUCIONES:

1. Verificar que el generador siempre tenga agua. Al iniciar, se recomienda que tenga al menos 10 litros.
2. Para encenderlo, primero se prende el piloto y luego el generador, regulando la llama con la válvula de aguja correspondiente.
3. Al término de su utilización (del generador) debe de aliviarse la presión abriendo las 4 válvulas y cerrando el suministro de gas.

BOMBA DE AGUA

BOMBA DE AGUA

1. Arrancar la bomba
2. Abrir la válvula
3. Una vez hechas las mediciones cerrar la válvula
4. Desconectar la bomba

Con el fin de minimizar los errores se dan las siguientes recomendaciones:

- a) El agua en circulación no debe tener ninguna sustancia en solución o en suspensión.
- b) El agua de la cubeta debe cubrir la pichanca cuando se halle funcionando la bomba, de otra manera entrará aire en el sistema y no será constante el gasto.
- c) Mantener en la misma posición la manguera empleada para cerrar el sistema hidráulico de la tubería a la cubeta.
- d) Al hacer las lecturas en el manómetro y el vacuómetro, la visión debe ser perpendicular al instrumento.
- e) Al efectuar la medición de la diferencia de alturas ($Y_2 - Y_1$), utilizar la graduación del flexómetro en su parte media.
- f) Los diámetros interiores \emptyset de la succión y la descarga, serán dados por los estandares del fabricante.
- g) Observar las posibles variaciones en la diferencia de potencial en las líneas de suministro de energía eléctrica.

MOTOR DE AIRE CALIENTE (STIRLING)

Motor de aire caliente Indicador pV

¡Atención!

Para la seguridad del motor de aire caliente hay que tener muy especialmente en cuenta los principios siguientes:

1. Asegurar un buen engrase de la pared interior del cilindro.
2. Antes de cada puesta en marcha del motor examinar girando el volante de impulsión con la mano si el émbolo y el desplazador se mueven libremente.
3. Asegurar una impecable circulación del agua refrigerante y controlar la temperatura así como la cantidad de agua refrigerante que fluye. El agua tiene que ser como máximo tibia.
4. Poner la calefacción en funcionamiento solamente por breve tiempo - con un calentamiento total máx. durante 15 segundos - sin el motor en marcha.
5. Depositar el calefactor siempre de tal modo que la espiral no pueda ser dañada. La espiral es muy sensible y no debe tocarse.
6. Atornillar el termómetro o el tubo de ensayo sólidamente con la fuerza moleteada en la brida. En el cilindro reina sobrepresión.

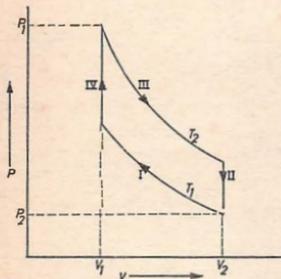


Fig. 2

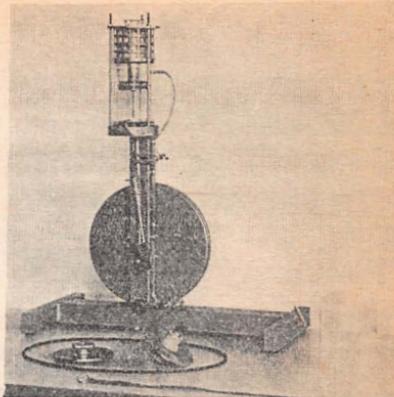


Fig. 1

7. Observar siempre las notas (pág. 16) y las prescripciones de cuidados (pág. 17).

El motor de aire caliente (388 18) (fig. 1) sirve para la demostración de un proceso termodinámico y de su inversión.

Contrariamente a la mayoría de las máquinas técnicas térmicas, este motor no es descrito por el conocido ciclo de Carnot sino por el menos conocido ciclo de Stirling que tan solo recientemente ha adquirido una importancia técnica. En este último, a una expansión isotérmica sigue una transformación isócara, a la que de nuevo sigue una compresión isotérmica con retroceso isócara subsiguiente a la temperatura inicial (fig. 2 representación esquemática del curso del proceso). La fig. 3 muestra el ciclo de Carnot y el de Stirling en el diagrama pV . Las curvas de igual temperatura (isotermas)

son hipérbolas equiláteras. Las adiabáticas del ciclo de Carnot discurren entre las isotermas pero son más empinadas que éstas. (Superficie con líneas estiradas: ciclo de Carnot, superficie con líneas punteadas: ciclo de Stirling).

El ciclo recorrido por un motor de aire caliente puede demostrarse con el indicador pV (388 20) mediante un diagrama pV , representando la presión del gas de trabajo como ordenada y su volumen como abscisa.

El motor de aire caliente presente tiene una relación de compresión de aprox. 1:2 y un volumen de la cilindrada de aprox. 140 cm^3 . Su ciclo de trabajo es fácilmente reversible. Al accionarse con energía mecánica puede funcionar como bomba térmica o como máquina frigorífica.

Si se comparan los balances de energía del ciclo de Carnot y del de Stirling, aparece entonces el ciclo de

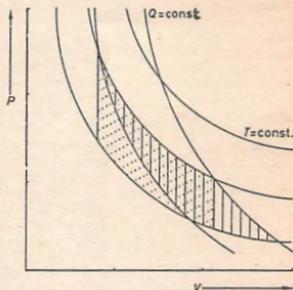


Fig. 3

Carnot mucho más favorable que el ciclo de Stirling. Mientras que en el primero tiene lugar la transición a otra temperatura de forma adiabática, es decir, sin intercambio de calor con el medio ambiente, en el ciclo de Stirling hay que aportar calor al gas de trabajo durante el calentamiento isócoro. Este calor es cedido más tarde sin rendimiento al medio ambiente durante el enfriamiento isócoro.

No obstante, si el calor perdido es acumulado y si se emplea de nuevo en el calentamiento isócoro, entonces puede mejorarse notablemente el balance de energía. En la máquina monocilíndrica aquí mostrada en la transición de la parte calentada a la enfriada del cilindro, el gas fluye a través del llamado regenerador de lana de cobre. Este regenerador absorbe el calor del gas calentado, lo acumula y lo cede durante el retroceso al gas que se ha expandido en el intervalo. De este modo queda notablemente mejorado el rendimiento del motor de aire caliente. En condiciones técnicas alcanza éste, en caso límite, incluso el rendimiento del ciclo de Carnot.

1. Descripción 1.1. Motor de aire caliente (38818)

Sobre un soporte de metal en forma de doble T provisto con pies de goma resistentes al resbalamiento, reposa una barra vertical que sostiene el motor de aire caliente de un total de 50 cm de altura. La figura 4 muestra en dibujo en sección la estructura fundamental del motor de aire caliente. El motor se compone en esencial de un cilindro de trabajo en el cual 2 émbolos (1 y 2) ejecutan los movimientos con un desplazamiento de fases de 90°. El cilindro de trabajo es un tubo de vidrio resistente al calor fabricado con precisión. La parte inferior del cilindro de trabajo está rodeada por un tubo envolvente transparente de plástico para el agua refrigerante (4). Este tubo está provisto con dos empalmes de entrada (5) y salida (6) del agua refrigerante. El aire en la parte superior del cilindro (3) puede calentarse por medio de un bobinado de calefacción.

Los dos émbolos en el interior del cilindro de trabajo son denominadas conforme a su funcionamiento. El émbolo desplazador (2) fuerza la transición del gas de la parte superior en la parte inferior del cilindro y viceversa. El émbolo de trabajo (1), por el contrario, cisa el volumen cilíndrico contra el medio ambiente; con ayuda de este émbolo, el trabajo mecánico puede tomarse del o aportarse al sistema mediante una variación del volumen del gas de trabajo.

El émbolo desplazador por encima del émbolo de trabajo es igualmente de vidrio resistente al calor y por su parte inferior está cerrado por un disco de metal que es refrigerado con agua por medio del vástago hueco del émbolo. Rendijas radiales en el disco permiten penetrar el aire del cilindro con transmisión de calor. Los empalmes de entrada y salida del agua refrigerante (13) para esta pieza se encuentran en la articulación del vástago de émbolo situado en el centro de la barra circular en dirección hacia abajo.

El émbolo desplazador tiene una cavidad axial que sirve para el intercambio de aire entre la parte del cilindro refrigerada y la no refrigerada o calentada. Esta cavidad está rellena en parte con lana de cobre (7), con el fin de mejorar el balance de energía de este motor monocilíndrico que trabaja por el ciclo de Stirling mediante una acumulación de calor para las transformaciones isócoras del gas de trabajo.

El émbolo de trabajo que se mueve con un desplazamiento de fases de aprox. 90° con relación al émbolo desplazador efectúa un ligero movimiento basculante adicionalmente a cada carrera debido al vástago de émbolo común sobresaliente hacia abajo. El vástago hueco del pistón está provisto con una oliveta cerrable con una lapa de plástico. En este sitio puede acoplarse un manómetro (11), para medir la presión interior del cilindro, por ej. también el indicador pV (388 20)

Ambos vástagos del émbolo (12) terminan en cojinetes (10) montados de forma excéntrica sobre un volante de impulsión (9) (\varnothing aprox. 25 cm) que debe asegurar una marcha uniforme del motor.

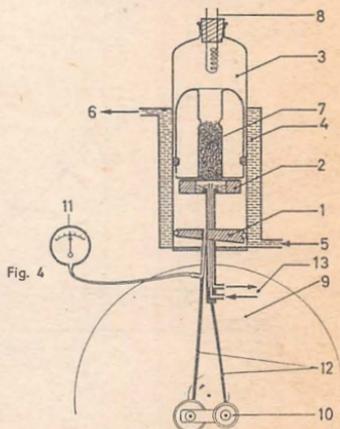
En su borde exterior el volante posee una ranura para el accionamiento por medio de una correa trapezoidal o una junta toroidal con ayuda de un motor de experimentación (347 25 ó 26). Además, sobre la rueda de impulsión puede colocarse un asa para el caso de que el motor de aire caliente, con objeto de observar mejor los procesos de trabajo, tenga que ser movido con la mano. Sobre el cubo de la rueda de impulsión se encuentran además un espiga cilíndrica en la cual puede tomarse el momento de giro en el experimento, de frenado, para determinar el rendimiento del motor.

Los dos vástagos de émbolo se componen cada de ellos de dos piezas. Las dos piezas están unidas entre sí mediante un tornillo doble, uno de cuyos lados está dotado con rosca a la izquierda y el otro con rosca a la derecha. Ambos extremos de los tornillos son asegurados mediante tuercas M 6 (al montarse debe tenerse en cuenta para cuando se cambie el manguito de junta en el émbolo de trabajo).

En el pie del motor de aire caliente está atornillado un soporte con 4 empalmes de tubo de goma. Sobre dos de estos empalmes (7 mm \varnothing) antes de la puesta en marcha hay que colocar tubos de goma (307 65), de los cuales uno se coloca suelto en el desagüe próximo (empalme derecho) y el otro en la llave del agua sobre un manguito (empalme izquierdo). La entrada y la salida están marcadas con flechas. Para la circulación del líquido refrigerante puede emplearse también la bomba de inmersión (306 98). Hay que poner atención a una correcta dirección del flujo.

Los dos otros empalmes (traseros) de tubos de goma están ya provistos con tubos de PVC transparentes. El sistema refrigerante puede reconocerse en la fig. 4. El agua refrigerante en este sistema debe fluir desde el émbolo de desplazamiento hacia el empalme inferior de la camisa refrigerante.

Sobre el borde de la camisa refrigerante se ha colocado un anillo de fundición de aluminio y una pieza adicional en forma de jaula. Sobre la misma se ha colocado una placa con un taladro (\varnothing aprox. 3 cm) para la brida con bobinado de calefacción



(8) o tubo de ensayo o termómetro (388 19). Ambas piezas están fijadas sobre 3 bulones con roscas y marcadas con puntos rojos los cuales, en el montaje, deben cubrirse para asegurar un asiento exactamente céntrico del babinado de calefacción o del termómetro o del tubo de ensayo en la parte superior del cilindro.

La brida se sujeta con tres tuercas de mariposa sobre los 3 bulones roscados. En su parte inferior tiene un anillo de junta de silicona que se ajusta exactamente al borde del cilindro. Los tres bulones con rosca están insertados en la pieza de la barra. La posición de los empalmes del tubo de goma de la camisa refrigerante con relación a estos bulones puede verse en la fig. 1, y tiene que tenerse en cuenta cuando se efectúe un posible desmontaje o montaje.

Como accesorios para el motor de aire caliente se suministra:

- 1 pieza de brida con filamento de calefacción para el accionamiento como motor térmico (fig. 5)
- 1 pieza de brida con junta atornillable para tubo de ensayo con líquido (fig. 6) o termómetro (388 19, fig. 7) para la demostración como máquina frigorífica (fabricación de hielo) o como bomba térmica (calentar el agua n. ebullición)
- 1 asa para encajarlo en la rueda de impulsión y para arrancar el motor en la puesta en funcionamiento como motor térmico o para accionar el motor a mano con objeto de tener una mejor caracterización de los procesos de trabajo en el cilindro (fig. 8)
- 1 trozo de cinta de cobre con 2 ojales para determinar el momento de giro (Núm. ET 68 389, fig. 8)
- 10 tubos de ensayo (590 53)
- 1 frasco de aceite de silicona, 50 ml, resistente al calor (388 21)
- 1 correa de accionamiento

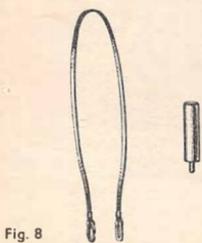


Fig. 8

1.2. Indicador pV

El indicador pV (fig. 9) registra por medio de un spot luminoso las variaciones de presión y de volumen como diagrama pV que tienen lugar en el cilindro de trabajo durante el funcionamiento del motor de aire caliente. La presión se transmite mediante un tubo delgado y flexible de PVC (1) a un manómetro (3) girando alrededor de su eje vertical. En lugar de una aguja, el manómetro está provisto con un espejo cóncavo (4) orientable alrededor de su eje horizontal. El espejo gira alrededor de su eje horizontal según las variaciones de presión en el interior del cilindro de trabajo. El movimiento rotatorio del manómetro (incluso el espejo) alrededor de su eje vertical es mecánicamente acoplado al movimiento del émbolo de trabajo de forma que los dos movimientos rotatorios, superponiéndose uno al otro, del espejo sean originados por las variaciones de presión y de volumen en el cilindro de trabajo.

El bloque (6) con el cojinete para el movimiento rotatorio vertical del manómetro y con el mecanismo de palanca (2) para la transmisión del movimiento del émbolo de trabajo al manómetro afecta la forma de un manguito y puede fijarse en una varilla de soporte.

El indicador pV debe montarse en combinación con el motor de aire caliente según la fig. 10 y ajustarse de tal modo que la polea pequeña de reenvío (7) en el indicador pV y la polea grande de reenvío que se enchufa en el soporte del motor de aire caliente, se encuentren en un mismo plano. Además, el hilo de pescar (8) que transmite el movi-

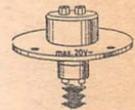


Fig. 5

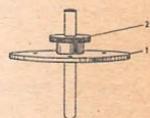


Fig. 6



Fig. 7

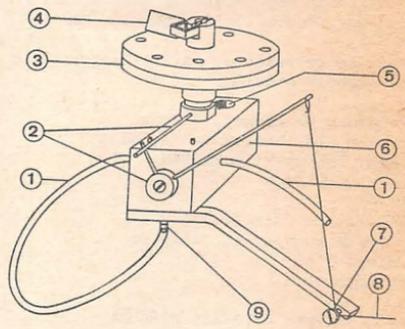


Fig. 9

miento del émbolo de trabajo al indicador pV tiene que ser siempre en estado tensado, mediante el muelle recuperador, para el movimiento rotatorio del manómetro, independientemente de la posición del émbolo de trabajo. El émbolo lleva un pasador con corchete para anudar el hilo de pescar. Del suministro del indicador pV forman parte la polea grande de reenvío (590 21) y una rueda de plástico con cojinete de bolas colocada sobre una clavija de fijación. El empalme (9) del tubo de PVC para la transmisión de la presión se encuentra debajo del manómetro.

2. PUESTA EN SERVICIO

Para el funcionamiento se necesitan las piezas siguientes:

1 Motor de aire caliente

Para el servicio como motor térmico adicionalmente:

1 Transformador de experimentación, consistente en:
Núcleo en U con yugo
Dispositivo de sujeción

Bobina de 500 espiras (con 220 V) o bien:

Bobina de 250 espiras (con 110 V)
Bobina de baja tensión

1 Tubo de goma, diámetro interior 7 mm.

Cables de experimentación

ADICIONALMENTE PARA EL SERVICIO COMO BOMBA TERMICA O MAQUINA FRIGORIFICA:

1 Motor de experimentación, 220 V, 70 W
1 Aparato de mando para el motor de experimentación o bien:

1 Aparato preselector para el motor de experimentación.

Y

1 Reóstato de cursor, 320 Ω o bien con tensión de red de 110 V

1 Motor de experimentación de 110 V, 70 W

Y

1 Reóstato de cursor, 110 Ω
Tubo de goma de un diámetro interior de 7 mm

1 Termómetro

EN CASO DE QUE NO EXISTA NINGUNA OTRA POSIBILIDAD DE REFRIGERACION

1 Bomba de inmersión para líquidos

El montaje del sistema de proyección, compuesto de una lámpara Leybold (450 60), una bombilla (450 51) y una lente condensadora con diafragma (460 17), se efectúa según la fig. 10 de forma que el haz de luz proveniente del diafragma incida en el centro del espejo cóncavo del manómetro. La distancia entre el espejo y el diafragma debe ajustarse de tal modo que el haz de luz reflejado da una imagen del diafragma en la pantalla de proyección. De esta manera se produce en la pantalla de proyección un pequeño spot luminoso

bien limitado que registra el diagrama pV durante el funcionamiento del motor de aire caliente. Conviene proteger la pantalla contra la luz incidente de otros focos luminosos eventualmente perturbadores.

PARA LA DEMOSTRACION DEL DIAGRAMA pV y para la determinación del grado de acción, adicionalmente:

1 Indicador pV (manómetro de espejo rotatorio)

1 Tuerca giratoria

2 Varillas de soporte de 75 cm

2 Pinzas de mesa

1 Lámpara Leybold

1 Bombilla, zócalo E 14 (6 V, 30 W)

1 Lente condensadora

1 Fuente de tensión, 6 V, 30 W

por ej. transformador 6 V, 30 W

1 Dinamómetro, 100 N

1 Vatímetro para demostraciones

1 Contador de revoluciones

Antes de la primera puesta en marcha, la pared interior del cilindro y el vástago del émbolo desplazador desde la culata y desde la parte inferior del motor se dotan abundantemente con aceite de silicona (388 21) que se aplica con un pincel de tal forma que los dos anillos de junta de caucho redondo funcionen sobre una superficie lubricada. Un rodaje prolongado reduce la fricción interna del motor y mejora la estanqueidad de las juntas.

3. Experimentos

3.1. El motor de aire caliente como motor térmico

Para demostrar la transformación de la energía térmica en trabajo mecánico el motor de aire caliente se monta según la fig. 10 en la proximidad de una conducción de agua de alimentación y de salida o en combinación con la bomba de inmersión para líquidos (306 98). El agua refrigerante tiene que mantenerse siempre limpia y después de parar el motor de aire caliente tiene que ser retirado del sistema de refrigeración.

Los residuos de líquidos que pueden encontrarse en la camisa de agua refrigerante al efectuarse el sustrato no perturban, debido a que se trata de agua destilada.

La guarnición de brida con el fin de aislamiento de calefacción tiene que colocarse de tal modo que éste no toque la pared interior del émbolo de desplazador o modo de cola.

El bobinado de calefacción que tiene una resistencia de aprox. 0,9 Ω conecta a la correspondiente fuente de tensión y primero, con una tensión de 20 V se lleva de la condensación a la amarillo.

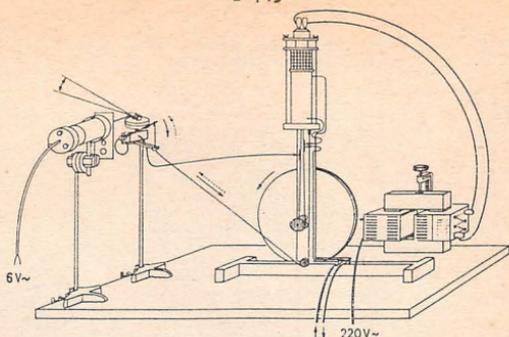


Fig. 10

¡Cuidado! No cargar el bobinado de calefacción con más de 20 V. Un servicio constante con esta tensión que vaya más allá de 10 minutos, sobre todo sin refrigeración, es inadmisibles.

Acto seguido debe hacerse arrancar el motor mediante el volante de impulsión a mano, en el sentido de las manillas del reloj. Si el motor funciona de modo uniforme, puede entonces disminuirse la tensión para fines de demostración en servicio constante hasta aprox. 12 V. Para las mediciones de potencia se escogen tensiones de calefacción de aprox. 16 hasta 20 V.

¡Atención! No es admisible un reposo a largo plazo del motor con una calefacción de cualquier potencia.

Con ayuda del indicador pV el diagrama pV puede demostrarse sobre una superficie de proyección mediante un spot luminoso (fig. 11). Este diagrama representa en particular los procesos siguientes en el motor de aire caliente:

En el recinto superior del cilindro, el gas de trabajo es expandido por admisión de calor (a una temperatura constante T_2), el émbolo de trabajo es impulsado hacia abajo (fig. 2, III). Por un movimiento ascendente del émbolo desplazador, el gas llega al recinto inferior del cilindro y es refrigerado al mismo tiempo hasta la temperatura T_1 (fig. 2, II). Aquí, es comprimido por un movimiento ascendente del émbolo de trabajo y cede entonces calor al agua refrigerante (fig. 2, I). El émbolo desplazador empuja el gas, que mantiene su volumen V_1 , otra vez en el recinto superior del cilindro, y con ello el gas es calentado hasta la temperatura T_2 (fig. 2, IV). De este modo se alcanza un proceso cíclico (durante la marcha en vacío aprox. 500 revoluciones por minuto) puesto que durante la expansión a T_2 más trabajo mecánico es cedido por el sistema de lo que se debe aportar al sistema para la compresión a T_1 .

La potencia caída del motor de aire caliente es determinada frenando el motor. La cinta de cobre que se acompaña se coloca en rededor para este fin, en el sentido de rotación, sobre el mandril cilíndrico que se encuentra asentado sobre el cubo del volante de impulsión. En el corchete, en un extremo de la cinta de cobre se suspende un dinamómetro de 100 N y el otro extremo se sujeta completamente flojo con la segunda mano. Luego se frena el motor estirando la cinta de cobre con el dinamómetro suspendido en sentido contrario al de rotación del motor hasta que éste haya alcanzado aproximadamente la mitad del número de revoluciones en marcha en vacío y se lee en el dinamómetro la fuerza necesaria para esto. El otro extremo debe mantenerse de manera muy floja para evitar mediciones erróneas.

¡Cuidado! Al cruzar la cinta de cobre el motor que gira puede arrastrar consigo la cinta y el dinamómetro. Si esto sucediera por descuido, hay que dejar entonces libres inmediatamente la cinta de cobre y el dinamómetro.

Con una tensión de filamento de 18 V en un experimento de laboratorio resultó una fuerza de frenado de aprox. 25 N y con una tensión de filamento de aprox. 16 V, una fuerza de frenado de aprox. 20 N. Para un tiempo de circulación de aprox. 6 revoluciones por seg. y un diámetro de mandril de 2,5 cm resulta una potencia cedida de aprox. 9,6 W con una tensión de filamento de 16 V y aprox. 12 W con 18 V de tensión de filamento.

El rendimiento del motor de aire caliente como motor térmico puede determinarse por la potencia con la cual se pone al rojo el bobinado de filamento y por la potencia que se determina en el experimento de frenado en el cubo de la rueda de impulsión. La primera puede medirse con el valímetro para demostraciones (531 84). El filamento tiene que funcionar para esto con una subtenisión debido a que el instrumento solamente puede cargarse hasta 10 A.

En consecuencia resultan los rendimientos para:

$$\eta = \frac{P_1}{P_2}$$

$$\eta = \frac{12}{320} = 0,038 \text{ con } 18 \text{ V tensión de filamento}$$

$$\eta = \frac{9,6}{260} = 0,037 \text{ con } 16 \text{ V tensión de filamento}$$

P_1 = potencia cedida
 P_2 = potencia eléctricamente aportada.

La valoración planimétrica de la superficie obtenida en el diagrama pV da el trabajo cuando para el calibrado se recurre al volumen (volumen de la cilindrada = 140 cm³) y a la presión determinada con ayuda de un manómetro calibrado.

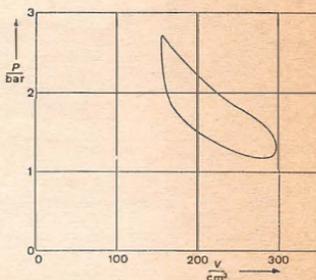


Fig. 11

La determinación del rendimiento es interesante ya que pone en evidencia que la energía térmica puede ser transformada sólo parcialmente en energía mecánica. Al principio se presentan pérdidas debido al frotamiento y a la radiación, pero el factor decisivo para el rendimiento son las temperaturas. Una temperatura alta (temperatura del gas caliente en la parte no refrigerada del cilindro) y una temperatura baja (temperatura del agua de refrigeración) determinan el rendimiento ideal de la máquina térmica.

$$\eta_{\text{ideal}} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}; (T_2 > T_1)$$

Es evidente que este rendimiento ideal, abstracción hecha de las pérdidas de frotamiento y de radiación, debe ser siempre menor que 1. En esta ecuación tienen que aplicarse las temperaturas de la escala Kelvin. Únicamente si la temperatura baja está aproximándose al punto cero absoluto, el rendimiento del motor térmico se aproxima al valor 1. Pero evidentemente un tal motor térmico no es realizable.

3.2. El motor de aire caliente como máquina frigorífica

Con este experimento hay que demostrar que en un proceso termodinámico del orden de un ciclo de Stirling, un gas, a una temperatura elevada, cede el calor que ha absorbido a una temperatura baja (consumiendo energía mecánica). El montaje experimental se lleva a cabo según la figura 12 (montar la polea escalonada de acuerdo con la figura). El conmutador en el aparato preselector para el motor de experimentación o en el aparato de mando se regula para una marcha o la derecha.

Empleando el motor de experimentación para 110 V sin aparato preselector ni aparato de mando, la correa de accionamiento permanece en estado no cruzado según la figura 12.

El tubo de ensayo lleno de agua se coloca en la guarnición de la brida en la parte superior del recinto del cilindro del motor de aire caliente y se sube el mismo hacia arriba lo necesario que la pared interior del cilindro, con la posición del émbolo desplazador en el punto muerto superior, no golpee en el suelo del tubo de ensayo de cristal y lo destruya.

Nota: Tener en cuenta los puntos rojos; atornillar el tubo de ensayo o el termómetro sólidamente en la montura. Durante la marcha se

obtiene una sobrepresión y las piezas pueden ser «expulsadas».

En el espacio de unos 10 minutos, según el caudal de agua escogido del orden de aprox. 0,5 hasta 1 ml, se hace congelar de esta forma el agua de la temperatura ambiente en el tubo de ensayo. El tiempo necesario para enfriar el tubo de ensayo depende de la temperatura del agua refrigerante, de la cuota de compresión y de la estanqueidad de las juntas. También se puede cambiar el tubo de ensayo por el termómetro e ilustrar la disminución de temperatura a intervalos determinados. Para este fin hay que introducir el termómetro hasta el principio de la escala en el taladro de la guarnición de brida. En el espacio de unos 10 minutos pueden alcanzarse temperaturas entre -15°C y -20°C .

Al funcionar como máquina frigorífica el gas de trabajo (temperatura T_1) que se encuentra en el recinto superior del cilindro absorbe calor de su ambiente durante la expansión hasta V_2 (movimiento del émbolo de trabajo hacia abajo) (fig. 2, I). Por un movimiento hacia arriba del émbolo desplazador el gas de trabajo alcanza entonces el recinto inferior del cilindro por aumento isocórico de la temperatura a T_2 (la lana de cobre en el regenerador cede calor) (fig. 2, II). Durante la compresión a V_1 (forzando por el exterior el émbolo de trabajo hacia arriba) el gas cede calor al agua refrigerante (fig. 2, III). A continuación, el gas se aporta de nuevo al recinto superior del cilindro (fig. 2, IV) manteniendo su volumen y disminuyendo su temperatura (la lana de cobre en el regenerador absorbe calor). El proceso se repite de nuevo.

De esta forma se extrae continuamente calor al gas en la parte superior del cilindro y se aporta al agua refrigerante lo que origina una disminución de la temperatura visible en el termómetro o en la formación de hielo en el tubo de ensayo.

3.3. El motor de aire caliente como bomba térmica

En la demostración del motor como máquina frigorífica se invierten únicamente los procesos en las partes superior e inferior del cilindro por un cambio del sentido de rotación. En este caso, se absorbe calor del recinto superior, su temperatura decrece debajo de la del agua refrigerante. En la demostración como bomba térmica, calor se absorbe

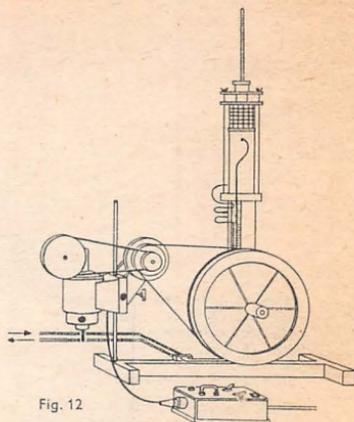


Fig. 12

del recinto inferior y se conduce al recinto superior. La temperatura del recinto superior del cilindro sobrepasa la del agua refrigerante. Como bomba térmica se monta el motor de aire caliente de acuerdo con la figura 12 (disponer las poleas escalonadas de acuerdo con la figura). El conmutador sobre el aparato preselector o en el aparato de mando para el motor de experimentación se regula para una marcha a la izquierda (empleando el motor de experimentación para 110 V sin aparato preselector o aparato de mando se cruza la correa de accionamiento) y la guarnición de brida con el tubo de ensayo se atornilla con las tres tuercas de mariposa uniformemente, de tal modo sobre la culata del cilindro que el tubo de ensayo quede colgado perpendicularmente en el recinto del cilindro. Para esto hay que sacarlo lo necesario, para que en la posición del émbolo desplazador en el punto muerto superior no toque el fondo del cilindro (lana de cobre) y quede por esto destruido o incluso quede dañado el émbolo desplazador. La oliveta μV tiene que cerrarse con la tapa de plástico.

Nota: tener en cuenta la marca (puntos rojos); atornillar el tubo de ensayo o el termómetro sólidamente en la montura. Se produce una sobrepresión y de este modo pueden «expulsarse» las piezas.

El tubo de ensayo puede llenarse con aprox. 0,5 hasta 1 ml de agua. El motor de aire caliente, accionado como bomba térmica, se encuentra ahora en situación de hacer hervir el agua que se encuentra en el tubo de ensayo en el espacio de aprox. 10 minutos (en función de la cantidad de agua). El tiempo necesario para el calentamiento depende de la temperatura del agua de refrigeración, de la relación de compresión y de la estanqueidad de las juntas.

La temperatura en el recinto superior del cilindro puede también medirse con un termómetro. Para este fin se retira de la guarnición de brida (1) el tubo de ensayo soltando el tornillo moleteado con taladro (2) (véase figs. 6 y 7), se coloca en el taladro un termómetro (388 19) hasta el comienzo de la escala y se atornilla la tuerca moleteada lo suficientemente fuerte.

El termómetro y el tubo de ensayo se colocan o se retiran con el anillo moleteado suelto, realizando un ligero movimiento de rotación.

Acto seguido es perfectamente posible observar un aumento de la temperatura en la parte superior del cilindro. Al accionar el motor de aire caliente como bomba térmica el gas de trabajo en la parte inferior del cilindro (temperatura T_1) extrae calor al agua refrigerante durante su expansión a V_1 (movimiento hacia abajo del émbolo de trabajo (fig. 2, I)). Mediante un movimiento hacia abajo del émbolo desplazador, el gas de trabajo fluye en la parte superior del cilindro (fig. 2, II) debido a un aumento isocórico de su temperatura hasta T_2 (se extrae calor a la lana de cobre en el regenerador). A continuación el gas cede calor al recinto superior del cilindro (fig. 2, III) durante la compresión a V_1 (por un movimiento hacia arriba del émbolo de trabajo forzado del exterior). Acto seguido el gas es desplazado de nuevo en la parte inferior del cilindro (fig. 2, IV) conservando su volumen y disminuyendo su temperatura (la lana de cobre en el regenerador absorbe calor). El proceso empieza de nuevo por el principio.

¡IMPORTANTE!

4. Notas

El motor de aire caliente debe refrigerarse bien por medio de la camisa frigorífica y el émbolo desplazador. Para este fin hay que tener en cuenta que del tubo de salida fluye agua en un chorro delgado hacia el recipiente de desagüe. Para montar el motor de aire caliente hay que disponer absolutamente de un empalme de agua y un recipiente de desagüe caso de que no se disponga de una bomba de inmersión para líquidos (306 98).

Al montar la pieza con el filamento de acuerdo con la marca (punto rojo) hay que procurar que el filamento no se arañe por la pared de vidrio del émbolo desplazador. Atornillando uniformemente las tres tuercas de mariposa puede eliminarse un error semejante.

Por motivos metódicos hay que llevar a cabo los experimentos siguiendo un orden tal que primero se demuestre el motor térmico, luego la máquina frigorífica y finalmente la bomba térmica. Sin embargo, si hay que llevar a cabo todos los experimentos en la misma clase, hay que presentar entonces primero la máquina frigorífica, luego la bomba térmica y finalmente el motor de aire caliente, ya que de lo contrario se pierde mucho tiempo para enfriar de nuevo con un funcionamiento de motor térmico.

Antes de un descanso prolongado del funcionamiento, es conveniente dejar funcionar el motor de aire caliente sin agua refrigerante y con la conexión del manómetro abierta, aprox. 15 minutos, con accionamiento de motor eléctrico, con el fin de que el agua de condensación sea expulsada de la parte inferior del cilindro.

¡IMPORTANTE!

5. Normas de cuidados

5.1. Una ventaja de este motor de aire caliente es el cilindro de trabajo a base de vidrio resistente al calor que permite ver las diversas fases del proceso. Por este motivo, hay que procurar mantener el agua refrigerante en la camisa frigorífica exenta de sedimentaciones (eventualmente hay que emplear agua desmineralizada), aspirando el agua, después de terminar el experimento, de las conducciones y de la camisa refrigerante, por ej. mediante una trompa de agua.

5.2. La pared interior del cilindro y el vástago del émbolo desplazador tienen que estar constantemente lubricadas. Los dos anillos de caucho deben funcionar solamente sobre una superficie bien lubricada, ya que de lo contrario puede originarse un daño del aparato o por lo menos un funcionamiento insatisfactorio. Como lubricante se emplea aceite de silicón (388 21), que se aplica con un pincel sobre los correspondientes lugares de la culata del cilindro de forma abundante y desde abajo. Esta lubricación es necesaria:

- a) con la primera puesta en marcha
- b) después de un prolongado reposo
- c) después de cada 10 horas de servicio.

El cubo de la rueda de impulsión debe lubricarse periódicamente con aceite de máquina de coser, que se aplica con un pincel.

5.3. Las piezas de chapa de latón del indicador pV deben engrasarse de vez en cuando con una vaselina exenta de ácido con el fin de protegerlas contra las influencias corrosivas. Las piezas que se deslizan frotándose entre sí (cojinete de deslizamiento para el eje del manómetro, cojinete de deslizamiento para la palanca de reenvío y las poleas de reenvío) deben protegerse igualmente contra la corrosión aplicando sobre las mismas aceite con un pincel (aceite de máquina de coser). Al mismo tiempo se logra que el muelle recuperador no disminuya su capacidad funcional.

5.4. Con el fin de poder reproducir en el diagrama pV el curso del proceso lo más fielmente posible, sin pérdidas de presión incontrolables, hay que eliminar inmediatamente las permeabilidades que se producen en el motor de aire caliente. Las causas de las permeabilidades del cilindro son un insuficiente lubricado de la pared interior del cilindro. Otras posibilidades o causas de permeabilidades resultan en los lugares siguientes:

- a) Tubos de PVC en las tubuladuras para medir la presión sobre el indicador pV. En este caso el correspondiente trazo de tubo tiene que ser sustituido.
- b) Las permeabilidades en la culata del cilindro deben evitarse colocando de forma exactamente céntrica y apretando las tuercas de mariposa.
- c) El manguito de empaquetadura en el interior del émbolo de trabajo, sin una lubricación suficiente, se ha vuelto permeable después de un prolongado período de funcionamiento y tiene que ser sustituido en este caso.

6. Indicaciones de montaje para el motor de aire caliente

El desmontaje del motor de aire caliente debe efectuarse siguiendo el orden que se indicó a continuación cuando se quiera cambiar el manguito de empaquetadura defectuosa o las piezas de vidrio que se hayan roto (véase fig. 13 hasta 16). Si solamente está defectuosa el émbolo desplazador, entonces no es necesario llevar a cabo los trabajos 10 hasta 13.

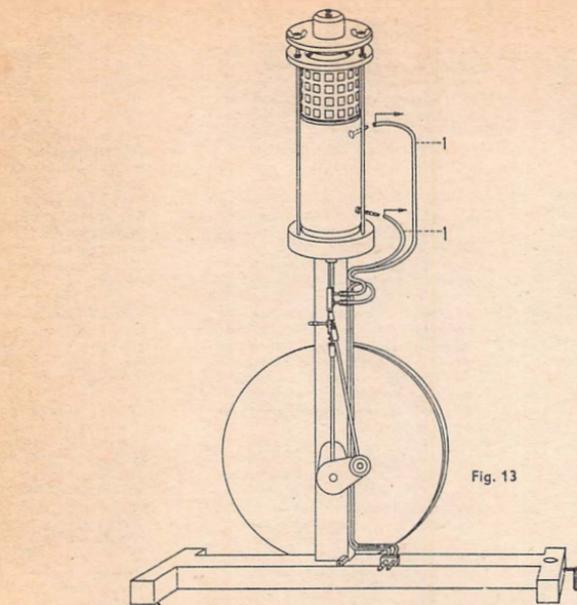


Fig. 13

Proceso de trabajo:

- 1) Retirar los tubos de goma (1) de los empalmes de tubos en la camisa refrigerante. Antes dejar salir el agua.
- 2) Soltar y sacar tres tuercas de mariposa M 4 (2)
- 3) Retirar la pieza (3) con el filamento, el tubo de ensayo o el termómetro.

¡Cuidado! No deformar el filamento.

- 4) Soltar y retirar tres tuercas M 4 (4) de los pernos roscados.
- 5) Retirar los discos de cobertura (5) con los tres taladros (4 mm) de los pernos roscados.
- 6) Retirar la pieza-jaula (6).
- 7) Sacar la arandela (anilla) intermedia (7).
- 8) Sacar el cilindro refrigerante con la camisa refrigerante (8) y el anillo de junta.
- 9) Desatornillar completamente el émbolo desplazador con el cilindro de vidrio (9), después de haber soltado la contratuerca (10).
- 10) Desatornillar la tuerca exagonal M 6 (10) del tubo refrigerante (11).

11) Desatornillar tres tornillos de la culata del cilindro (12) con arandelas (13) de la parte inferior del émbolo de trabajo (14).

12) Levantar el émbolo de trabajo (14) del tubo refrigerante desplazándolo ligeramente de un lado al otro. Sacar el manguito de empaquetadura (15) y en caso necesario reemplazarlo.

13) El montaje se efectúa por el orden inverso. Hay que procurar entonces que el manguito de empaquetadura (15) no sea empujado sobre la rosca en el tubo refrigerante sino cuidadosamente atornillado en el sentido de giro de la rosca con el fin de que el labio obturador no sea dañado. El manguito de empaquetadura tiene que adaptarse a la pieza (16) de acuerdo con la disposición de los taladros.

Acto seguido puede colocarse el émbolo de trabajo (14) y atornillarse con la pieza (16). Al atornillar el émbolo desplazador hay que procurar dotar el paso de rosca de la tuerca exagonal con algunas gotas de Loctite, producto para asegurar los tornillos, que puede adquirirse en el comercio del ramo. Con el fin de que este agente de estanqueidad pueda endurecer, después de este montaje el motor de aire caliente no debe ponerse en funcionamiento durante unas 20 horas.

Hay que procurar también que el cilindro refrigerador (8) se introduzca de nuevo girándolo ligeramente sobre el émbolo desplazador. El diámetro del anillo junta en el émbolo de trabajo es mayor que el diámetro interior del cilindro refrigerador (8) con el fin de asegurar que se presione bien a la pared interior. Previamente debe engrasarse bien con aceite de silicona con el fin de poder introducirlo de nuevo lo más cuidadosamente posible en el cilindro refrigerador.

Todas las piezas deben limpiarse cuidadosamente antes de proceder a su montaje y en todos aquellos lugares donde no se mueven libremente deben engrasarse con aceite de silicona.

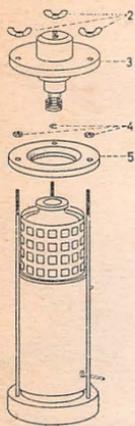


Fig. 14a

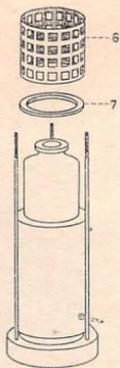


Fig. 14b

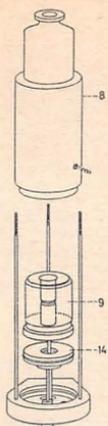


Fig. 15a

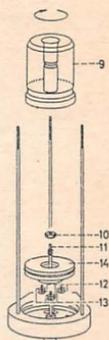


Fig. 15b

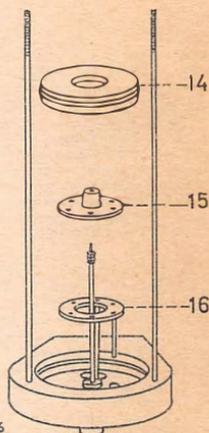


Fig. 16

Núcleo en U con yugo y dispositivo de sujeción

1. Descripción

Núcleo en U y el yugo (562 11) están formados por chapas de dinamo muy finas y exentas de párdidas, que por medio de remaches se mantienen fuertemente unidas. La sección transversal del hierro alcanza 40×40 mm. Las dos caras frontales del núcleo en U y la cara inferior del yugo han sido cuidadosamente rectificadas y pulidas, a fin de que pueda obtenerse el mejor circuito de hierro cuando el yugo se fija encima del núcleo en U.

Para obtener esta unión se emplea el dispositivo de sujeción (562 12). Este se compone de una abrazadera de metal ligero con una espiga de hierro en su parte inferior y un tornillo moleteado en su parte superior. La espiga de hierro se introduce por el agujero central del núcleo en U, y a continuación se bloquea por medio del tornillo de retención del núcleo. Debajo de la extremidad inferior del tornillo moleteado del dispositivo de sujeción se encuentra un apéndice con una plaquita aislante. Esta sirve de pieza intermedia, cuando el tornillo moleteado del dispositivo de sujeción aprieta fuertemente el núcleo en U contra el yugo.

Para el almacenado y transporte las superficies rectificadas del núcleo en U y del yugo están provistas de una capa de protección anticorrosiva de apenas unos μm de espesor que no perjudica en ningún modo el flujo de inducción magnética y, por lo tanto, puede quedarse en las superficies (se puede quitar con disolventes, p. e. bencina de lavado). Después de ser desgastada esta capa por roce, proteger las superficies con grasa neutra contra la corrosión, en el caso de que el aparato tuviera que permanecer bastante tiempo sin funcionar.

2. Aplicaciones

El núcleo en U y el yugo se utilizan en muchos experimentos. En la mayoría de los casos se emplean formando parte del transformador de experimentación o bien en electroimanes simples.

a) Transformador de experimentación (Fig. 1)

En cada uno de los brazos del núcleo en U se coloca una bobina (562 13 a 562 22) con el número de espiras apropiado para el experimento a realizar. Las bobinas deben colocarse como se indica en la fig. 1. En un transformador así formado, se reconoce inmediatamente el enrollamiento primario y secundario, así como el circuito magnético cerrado.

La energía eléctrica transmitida por el aparato depende de la inducción magnética en el hierro, es decir, de la intensidad de la corriente en la bobina primaria o en la secundaria. Con una carga óhmica, las potencias primaria y secundaria rebasan un máximo con una intensidad creciente de la corriente secundaria a causa de la dispersión creciente. Por lo tanto, el transformador de experimentación es resistente a corto-circuitos, es decir, la bobina secundaria puede cerrarse en corto-circuito sin peligro de que la potencia admitida sea demasiado elevada.

b) Electroimán simple (Fig. 2)

Se puede utilizar el núcleo en U con dos bobinas por las que circula corriente continua para la construcción de un electroimán. En general se utilizan dos bobinas de 250 espiras (562 13). Además se emplea el yugo (circuito magnético cerrado) o bien el par de polos perforados (560 31).

La primera disposición se elige por ej. para poner en evidencia la fuerza portante de un electroimán (CD 539.244.2.

Las superficies frontales del núcleo en U y de las piezas polares tienen una polaridad diferente, si se unen los bornes (E) de las bobinas entre sí y se conectan los bornes (A) a la fuente de tensión continua (por ej. transformador de regulación para tensiones bajas, 562 39, tensión approx. 2-6 V —).

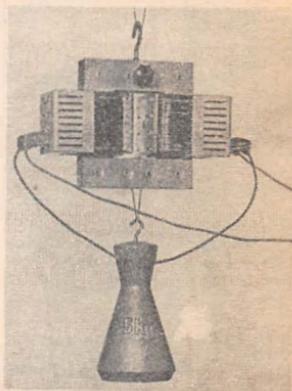


Fig. 2 (PH 2070)

Electroimán, compuesto de: núcleo en U con yugo, par de muelles de sujeción y gancho, 2 bobinas de 250 espiras calbes de experimentación y pesa de 5 kg.

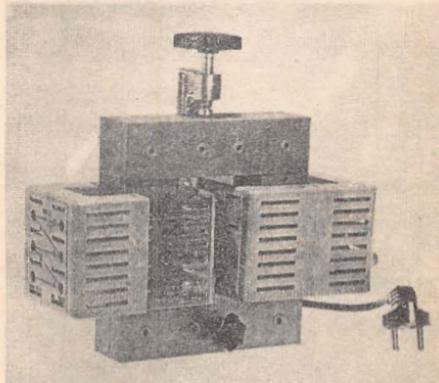


Fig. 1 (PH 2045)

Transformador baja tensión, 2 V hasta 20 V, formado por núcleo en U con yugo, dispositivo de sujeción, bobina de red 500 espiras para 220 V (o de 250 espiras) para 110 V, y bobina de baja tensión.

A P E N D I C E D

, REGLAMENTO DEL LABORATORIO

, FORMAS UTILIZADAS EN EL LABORATORIO

LINEAMIENTOS GENERALES

El profesor de Laboratorio de Termodinámica, debe conocer las normas que rijan el buen funcionamiento del laboratorio para que pueda desenvolverse ampliamente en el mismo; además, debe orientar adecuadamente a sus alumnos, a quienes también les hará llegar la información respectiva del reglamento. De esta manera, los estudiantes conocerán deberes y responsabilidades que han adquirido al ser alumnos regulares del mencionado laboratorio.

REGLAMENTO DEL LABORATORIO DE TERMODINAMICA

I CONTROL DE EQUIPO

Préstamos, reportes de mal funcionamiento, faltantes, deterioro, etc., del equipo o materiales del laboratorio, se hará mediante formas adecuadas para cada servicio, éstas las podrán adquirir en la bodega del laboratorio.

- Forma para préstamo de equipo o materiales, ya sea a profesores o alumnos.
- Forma para reportar equipo dañado.
- Forma para reportar mantenimiento correctivo o preventivo del equipo.
- Forma para préstamo de equipo por brigadas en cada una de las prácticas.

El horario de préstamos, será únicamente el señalado por el laboratorio y aparecerá en la bodega del mismo.

Es recomendable que los profesores que requieran de cierto equipo como auxiliar didáctico o para algún uso específico y que no sea compatible el horario de su clase con el del laboratorio (préstamos) lo pida con anticipación.

Para que a un alumno se le pueda conceder algún préstamo de equipo, es necesario que deje en garantía su credencial vigente de la Facultad de Ingeniería, UNAM; a los Profesores se les pedirá que tan sólo firmen la forma correspondiente.

A los alumnos se les podrá prestar el equipo siempre y cuando sea autorizado por:

El profesor que en ese momento tenga a su cargo la práctica del laboratorio, el jefe del laboratorio, o bien el coordinador de la materia.

El tiempo máximo que durará el préstamo será de 48 horas y deberá justificarse dicho tiempo, siendo necesario autorizarse el préstamo por el jefe del laboratorio, ya que debe preverse que no se va ya a usar el equipo en ese tiempo.

En clase ordinaria de laboratorio, se les dará el equipo armado a los alumnos para evitar tiempos inútiles de armar y desarmar en cada clase y al mismo tiempo se previene el daño que se le pueda ocasionar al mencionado equipo.

La persona que dañe, pierda o destruya equipo y material, deberá reparar o reponerlo en virtud de que él es el directamente responsable y no se aceptará el importe del mismo.

II REALIZACION DE LAS PRACTICAS

1. Las sesiones se iniciarán puntualmente y pasados quince minutos, no se permitirá la entrada al alumno en el laboratorio.
2. El alumno que acumule tres faltas en total se le dará de baja.
3. El alumno deberá presentar las prácticas en el grupo en que se inscribió, salvo casos justificados (presentación de examen o enfermedad) podrá asistir como máximo en dos ocasiones a otro grupo. En este caso, el alumno tendrá falta aunque sí tendrá derecho a calificación en la práctica.

4. No se permitirá al alumno la entrada a la bodega del laboratorio.
5. Durante la práctica, se les prestará a los alumnos el equipo necesario para el desarrollo de ésta, responsabilizándose cada brigada del buen uso y conservación que se le dé. En caso de pérdida destrucción o deterioro del equipo, la brigada lo repondrá.
6. Dos llamadas de atención por indisciplina, en detrimento del aprovechamiento del grupo, ameritará que el alumno desaloje el laboratorio. Si el alumno reincide en su indisciplina, de acuerdo a lo anterior, se le dará de baja.
7. El material y equipo, solamente se prestará mediante la entrega de la credencial de la UNAM vigente de alguno de los miembros de la brigada.

DEPARTAMENTO DE FISICA

LABORATORIO DE TERMODINAMICA

CLAVE 1068

GRUPO 40

FECHA 27/II/79

PRACTICA # 12

NOMBRE DEL INSTRUCTOR JO

Firma [Signature]

VALE POR EL SIGUIENTE EQUIPO:

Un consolador de 3 1/2"

Un cordón p/ mujer

p/ punta de flecha.

Un látigo.

Lubrificante.

Un cordón p/ hombre.

Un consolador extra-mega-Jumbo

RECIBI EL EQUIPO COMPLETO Y EN BUEN ESTADO FISICO:

BRIGADA	NOMBRE DEL ALUMNO RESPONSABLE	NUMERO DE CTA.	FIRMA
1	_____	_____	<u>[Signature]</u>
2	_____	_____	<u>[Signature]</u>
3	_____	_____	<u>[Signature]</u>
4	_____	_____	<u>[Signature]</u>
6	_____	_____	<u>[Signature]</u>
7	_____	_____	<u>[Signature]</u>
8	_____	_____	<u>[Signature]</u>
2	_____	_____	<u>[Signature]</u>
10	_____	_____	<u>[Signature]</u>

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE CIENCIAS BASICAS
DEPARTAMENTO DE FISICA
COORD. DE FISICA EXPERIMENTAL

REPORTE DE ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO

DESCRIPCION DE LA ACTIVIDAD	NO. DE INVENTARIO

FECHA

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE CIENCIAS BASICAS
DEPARTAMENTO DE FISICA
LABORATORIO DE TERMODINAMICA

EXAMEN: 1er. PARCIAL

SEM.

OBJETIVO: Evaluar los conocimientos teórico-prácticos que el alumno ha adquirido en base a los fenómenos observados y experimentos realizados durante el desarrollo del curso.

RELACION DE PROFESORES QUE APLICARON EL EXAMEN:

GRUPO	PROFESOR	NO. ALUMNOS	FECHA	FIRMA
01				
02				
03				
04				
05				
06				
07				
08				
09				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

A t e n t a m e n t e

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria, D.F., a de de 198
EL JEFE DEL LABORATORIO DE TERMODINAMICA

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE CIENCIAS BASICAS
DEPARTAMENTO DE FISICA
LABORATORIO DE TERMODINAMICA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

REPORTE DE ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO EN EL
LABORATORIO DE TERMODINAMICA

DESCRIPCION DE LA ACTIVIDAD

NOMBRE Y FIRMA DE LA PERSONA
QUE REALIZO LA ACTIVIDAD

F E C H A

Vo. Bo. DEL ENCARGADO DE
MANTENIMIENTO



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE CIENCIAS BASICAS

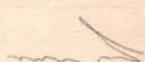
DEPARTAMENTO DE FISICA

BOLETA DE LABORATORIO

Nombre del alumno				No. de cuenta		
Tapia Gonzalez Luis				56 1178-5		
Laboratorio				Cve	Gpo.	Sem.
Termodinámica				6	41	II
Calificación				Resultado		
No.	0	Letra	CERO	cer		

Fecha: 21/2/99

Vigencia: 3/2/99


El Jefe del Laboratorio

DEPARTAMENTO DE FISICA
LABORATORIO DE TERMODINAMICA

REPORTE DE EQUIPO DAÑADO

ALUMNO _____ NO. CUENTA _____ FIRMA _____

GRUPO DE LABORATORIO _____ GRUPO DE TEORIA _____

EQUIPO DAÑADO _____ CLAVE _____

ORIGEN DEL DESPERFECTO _____

FECHA DEL DESPERFECTO _____ FECHA DE REEMPLAZO _____

REPORTO

RECIBIO EQUIPO REEMPLAZADO



DEPARTAMENTO DE FISICA

LABORATORIO DE TERMODINAMICA

PRESTAMO DE EQUIPO

SOLICITANTE _____ No. CUENTA _____

MATERIA _____ GRUPO _____ SALON _____

CLASIFICACION	DESCRIPCION	CLAVES	EMPLEO DESTINADO
<input type="radio"/> INSTRUMENTOS			
<input type="radio"/> HERRAMIENTA			
<input type="radio"/> EQUIPO AUDIOVISUAL			
<input type="radio"/> EQUIPO AUX. TEORIA			
<input type="radio"/> MATERIAL PRACTICA			

SALIDA: FECHA _____ HORA _____ AUTORIZO _____

ENTREGA: FECHA _____ HORA _____ RECIBIO _____ FIRMA DEL SOLICITANTE _____

1870