

Trabajo Práctico

EQUIVALENTE MECÁNICO DEL CALOR

Introducción

El principio de la conservación de la energía nos plantea la *equivalencia* entre *calor* y *trabajo mecánico*. Para los casos en donde suponemos que toda la energía mecánica puede convertirse en calor, podemos obtener experimentalmente el valor numérico de esta relación o equivalencia. El trabajo es normalmente medido en unidades de *Julios* (*Joule*) y la energía térmica o calor es medido en unidades de *calorías*. La equivalencia no es inmediatamente obvia y debe determinarse experimentalmente. Esta relación de equivalencia es llamada "Equivalente Mecánico del Calor".

El aparato científico modelo TD 8551A de PASCO para Equivalencia Mecánica del Calor, permite la determinación de dicha relación con buena exactitud (dentro del 5 % de error relativo). En este aparato, mostrado en la *fig. 1*, una cantidad determinada de trabajo es efectuada por el *giro de una manivela* que acciona un *cilindro de aluminio*, el cual tiene enrollada una *cuerda de nylon* con varias vueltas a su alrededor. Al girar la manivela, hace que la fricción entre la cuerda y el cilindro sea suficiente para soportar la masa colgada del otro extremo de dicha cuerda.

Esto asegura que la acción del torque sobre el cilindro es constante y medible. Un *contador* cuenta el número de vueltas mientras se hace girar el cilindro y la cuerda convierte el trabajo en energía térmica, la cual eleva la temperatura del cilindro de aluminio.

Un *termistor* (*resistencia eléctrica que varía con la temperatura*) está colocado en el interior del cilindro de aluminio y, a través de la medición de su resistencia eléctrica, puede determinarse la temperatura de dicho cilindro.

Mediante la medición del cambio de temperatura del cilindro, puede calcularse la relación entre el trabajo mecánico realizado y la energía térmica transmitida por la fricción, o sea el "Equivalente Mecánico del Calor" buscado.

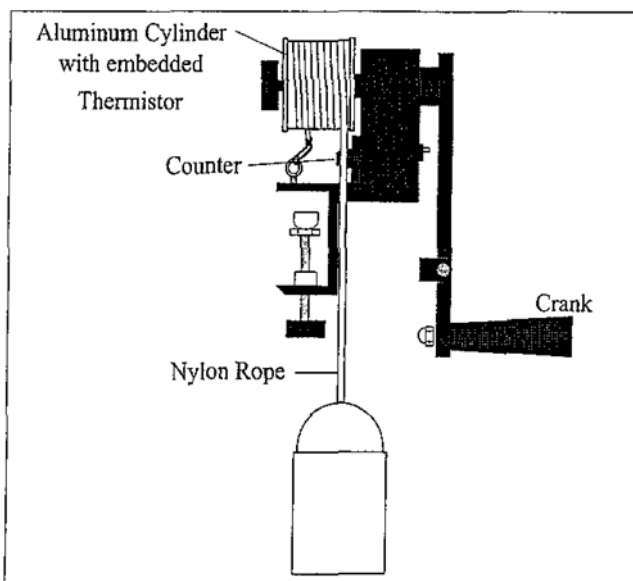


Figure 1 Mechanical Equivalent of Heat Apparatus

Equipamiento

- Pasco TD 8551A (*aparato para operar manualmente*).
- Multímetro (*para medir resistencia eléctrica, como Ohmetro*).
- Termómetro ó termocupla (*para controlar las temperaturas preliminares*).
- Balde con una masa conocida en su interior (*entre 50 y 100 N de arena*).
- Hielo conservado en recipiente aislante (*para refrigerar inicialmente el cilindro de aluminio por debajo de la temperatura ambiente*).
- Calibre y balanza para medir la masa y el diámetro del cilindro de aluminio (*si se desea que esto sea parte del proceso del experimento*). Los valores aproximados son:
m = $200 \pm 1,5$ g
D = $4,76 \pm 0,02$ cm ($4,94 \pm 0,05$ cm con el espesor de la cuerda incluido).
- (Registrar la apreciación de los instrumentos de medida de longitud y masa).
- Termómetro de Mercurio.
- Ver *fig. 2*.

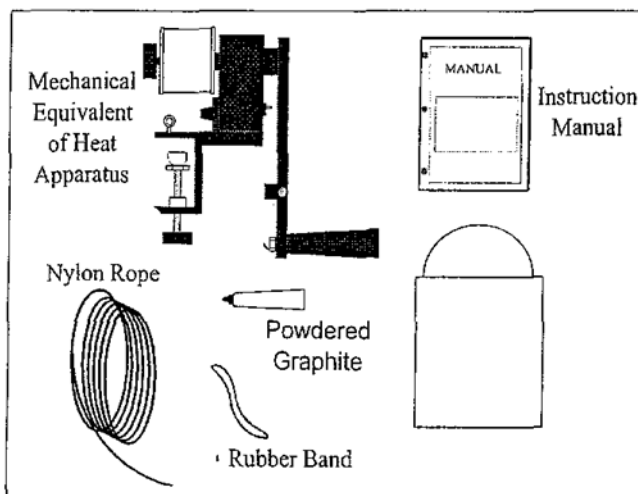


Figure 2 Equipment

Medición de la temperatura con el termistor

Para medir la temperatura del cilindro de aluminio, un termistor está colocado dentro del mismo. Si la resistencia del termistor es conocida, su temperatura puede ser determinada con mucha precisión. A través de la tabla de funcionalidad entre t ($^{\circ}\text{C}$) y R (Ω) adjunta al equipo (*agregada al final del presente instructivo*), puede determinarse la temperatura en función de la resistencia medida.

Los cables del termistor en el cilindro están soldados a dos anillos rozantes (ver *fig. 3*) y un par de escobillas proveen una conexión eléctrica entre los mismos y los conectores para fichas bananas. Enchufado el Ohmetro a los conectores, la resistencia del termistor (*y con ello su temperatura*) puede ser medida aún cuando el cilindro esté girando.

La temperatura obtenida a través del termistor es precisa y confiable, pero no es lineal; por ello es necesario usar la tabla "temperatura versus resistencia".

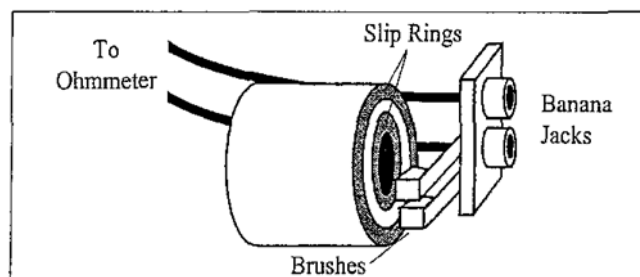


Figure 3 Measuring the Cylinder Temperature

Operación

- a. Con la balanza medir la masa m del cilindro de aluminio y anotar este valor en la "Planilla de registro de datos" indicada más adelante.
- b. Con el calibre medir el diámetro D del cilindro y anotar su radio $R = \frac{1}{2} D$ en la "Planilla de registro de datos".
- c. Antes de comenzar el experimento, rociar levemente la superficie del cilindro de aluminio con el polvo de grafito (*fig. 4*). Esto asegura que la cuerda deslice suavemente sobre el cilindro, proporcionando así una mejor prestación y un torque que no ocasione el desgaste del mismo.
Después de varias aplicaciones la cuerda de fricción estará impregnada y por lo tanto no será necesario continuar aplicando lubricante en todos los usos.

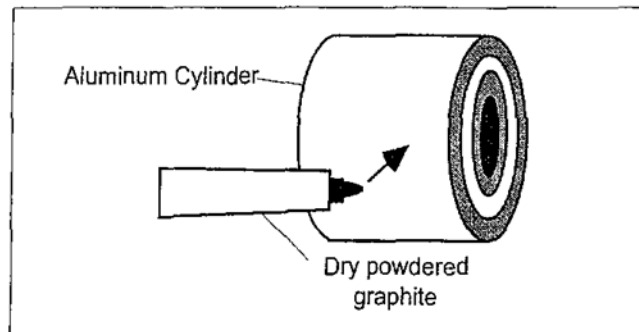


Figure 4 Lubricate Cylinder

- d. Montar el aparato sobre una tabla nivelada (*fig. 5*). Si el aparato no está nivelado, la cuerda tenderá a deslizar y por ello será dificultoso conseguir una cupla uniforme.

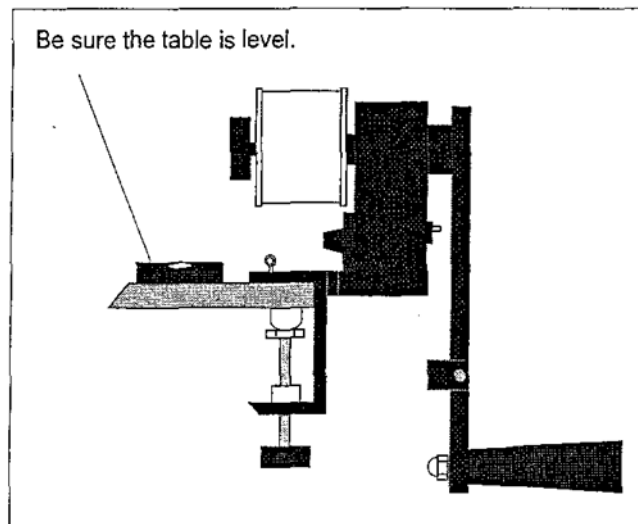


Figure 5 Level Table

- e. Al girar la manivela, nunca elevar la masa más alto que 3 cm sobre el nivel del piso, por razones de seguridad (*fig. 6*). Si la masa es elevada a demasiada altura, la manivela retornará causando posibles esfuerzos o roturas, lo cual no es conveniente

para el equipo ni para las personas que se encuentren cercanas. También, si se permite subir la cuerda comenzará a enrollarse la próxima vuelta, lo cual generará mayor elevación y consecuente agravamiento de la situación peligrosa.

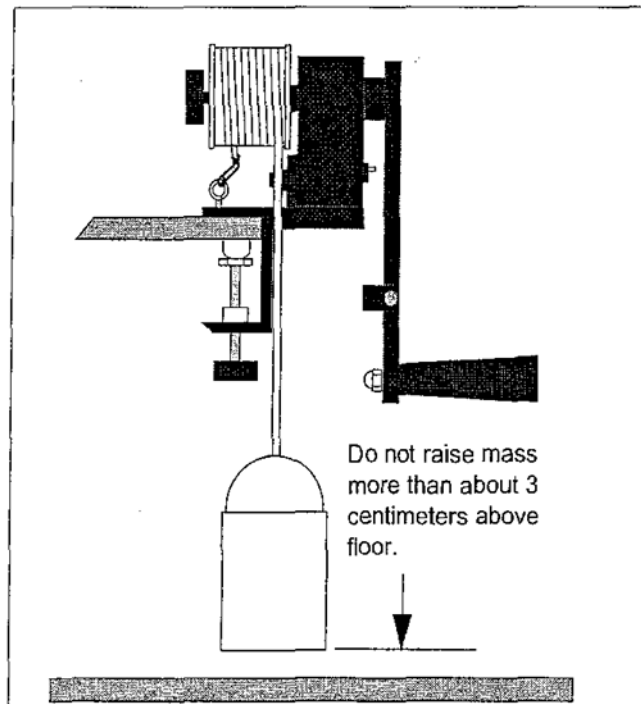


Figure 6 Don't Raise Mass too High

Realización del experimento

1. Desenrosque la pieza giratoria de ajuste (*color negro*) y saque el cilindro de aluminio (*fig. 7*). Coloque luego el cilindro en un refrigerador para reducir la temperatura al menos en 10 °C por debajo de la temperatura ambiente del laboratorio. Cuando el cilindro refrigerado es calentado por fricción, el punto medio deseable entre la más alta y la más baja de las temperaturas, es el de la temperatura ambiente. El calor será transferido desde el aire del laboratorio al cilindro cuando el mismo esté más frío y, a la inversa cuando esté más caliente, compensándose así las pérdidas de calor del cilindro cuando está girando y aumentando su temperatura. Como el cambio de temperatura del cilindro resultará simétrico alrededor de la temperatura ambiente, la cantidad de calor transferido hacia y desde el cilindro al ambiente será aproximadamente igual.

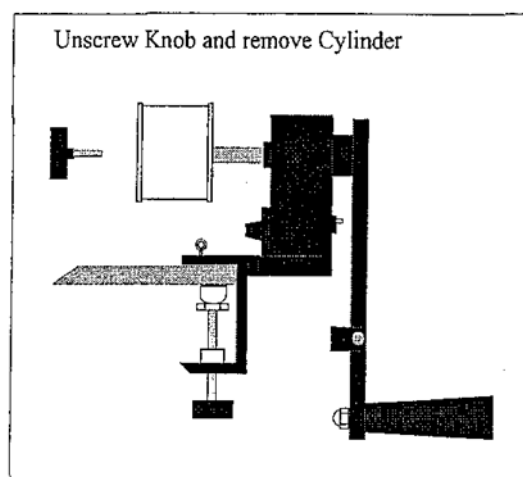


Figure 7 Clamp to Table and Remove Cylinder

2. Mientras el cilindro está frío ($t < t_{amb}$), planifique la diferencia de temperatura del experimento. *Idealmente*, la variación de temperatura del cilindro sería *entre 7 °C y 9 °C por debajo de la temperatura ambiente y la misma cantidad sobre la temperatura ambiente*. Por ello, mida y registre la temperatura ambiente y luego determine y registre la temperatura inicial y final que debería alcanzar el cilindro durante el experimento.
3. Utilice la tabla de "resistencia versus temperatura" para el termistor. Determine el valor de la resistencia que corresponde a cada una de los registros de temperatura antes determinados. También, determine el valor de la resistencia que corresponde a un grado centígrado por debajo de la temperatura final. Comience a girar lentamente la manivela cuando la temperatura se aproxime a esta última temperatura antes citada, de tal manera que la temperatura final que se registre concuerde con la temperatura final elegida.
4. Cuando el cilindro esté a la temperatura deseada ($t < t_{amb}$), colóquelo suavemente en el eje de la manivela. Asegúrese que los anillos de cobre estén hacia el lado de la manivela y entonces coloque la pieza giratoria de ajuste con firmeza.
5. Conecte los cables del Ohmetro en las fichas bananas (*fig. 8*). Previamente prepare el instrumento, seleccionando un rango acorde con los valores de resistencia que se han de medir.

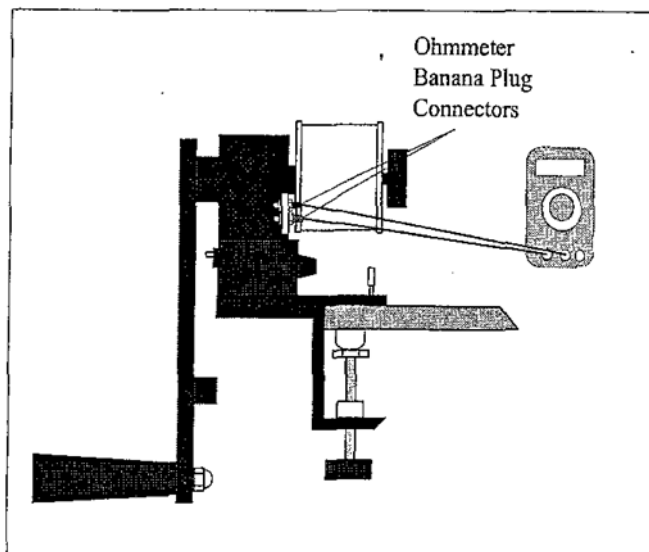


Figure 8 Hook up the Ohmmeter

6. Enrolle la cuerda varias veces alrededor del cilindro (*con cuatro a seis vueltas trabajará bien*), verificando que el balde quede a unos 3 cm del nivel del suelo. Asegúrese que la cuerda apoye plana contra el cilindro y cuelgue por la hendidura prevista en la placa base. Ate un extremo de la cuerda a la masa colgante (*fig. 9*). Cuando el cilindro está frío, el vapor del ambiente condensa sobre su superficie; en tal caso, seque el cilindro totalmente con un trapo o papel antes de enrollar la cuerda (*de esta manera, hacemos que el calor fluya hacia el interior del cilindro en lugar de evaporar el agua condensada*).
7. Llevar el *contador* a cero.

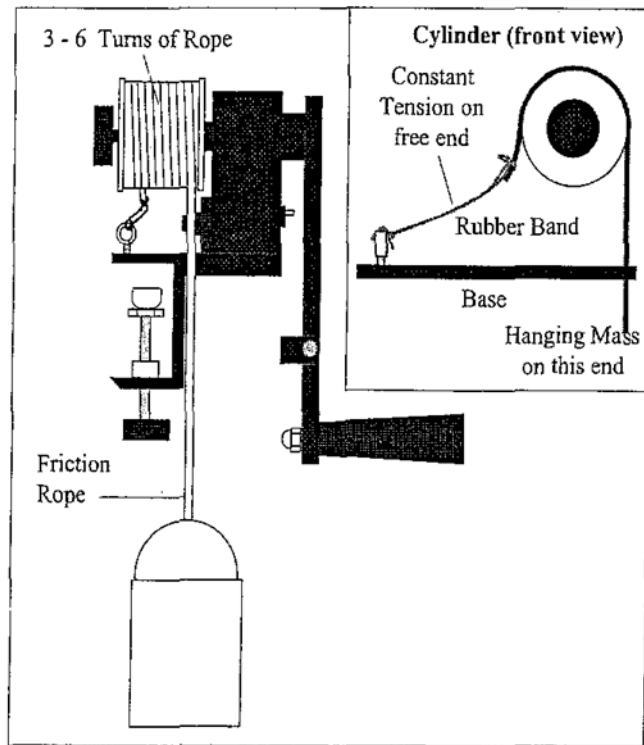


Figure 9 Add Friction Rope and Hanging Mass

8. Observe el Ohmetro cuidadosamente. Cuando la resistencia alcance el valor correspondiente a la temperatura inicial, arranque con la manivela girando rápidamente hasta que la temperatura indicada por el termistor sea 1 °C menor que la temperatura asignada para finalizar; luego gire lentamente mientras observa el Ohmetro. Cuando la temperatura alcanza el valor final, pare de girar. Continúe observando el Ohmetro hasta que la temperatura del termistor alcance el máximo (la resistencia será mínima y comenzará a caer). Registre esta temperatura más alta como la temperatura final.
9. Registre el número de vueltas \mathcal{N} .

Cálculos

Cálculo del Trabajo (\mathcal{W})

El torque τ ocasionado por la fricción de la cuerda es fácilmente calculable:

$$\tau = \mathcal{M} g \mathcal{R}$$

\mathcal{M} : masa colgada

g : aceleración de la gravedad = 9,8 m/s²

\mathcal{R} : radio del cilindro

El ángulo θ girado por el cilindro en una vuelta es 2π . El trabajo total desarrollado en \mathcal{N} vueltas es:

$$\mathcal{W} = \tau \theta = \mathcal{M} g \mathcal{R} 2 \pi \mathcal{N}$$

\mathcal{N} : número de vueltas girados por la manivela

Cálculo del calor transferido (\mathcal{Q})

El calor producido por fricción contra el cilindro de aluminio es determinado por el cambio de temperatura registrado, como:

$$\mathcal{Q} = m c (t_f - t_i)$$

m : masa del cilindro de aluminio

c : calor específico del aluminio = 0,220 cal / g °C

t_f : temperatura final del cilindro

t_i : temperatura inicial del cilindro

Calculo de $\mathcal{J} \Rightarrow$ Equivalente mecánico del calor

\mathcal{J} es la relación entre el trabajo realizado y el calor producido:

$$\mathcal{J} = W/\mathcal{Q}$$

Planilla de registro de datos

| | TEMPERATURA (°C) | Resistencia del Termistor (Ω) |
|--|---------------------|---|
| Temperatura ambiente | | |
| Temperatura inicial (t_i) (iniciar giro) | | |
| t_f ideal - 1 °C (iniciar giro lento) | | |
| t_f ideal (finalizar giro) | | |
| Temperatura final (t_f) (final efectiva) | | |

| | | |
|--------------------|---------------|--|
| masa del cilindro | m | |
| masa colgante | \mathcal{M} | |
| radio del cilindro | \mathcal{R} | |
| número de vueltas | \mathcal{N} | |

Cuestionario

1. Compare el valor de \mathcal{J} con el valor aceptado.
2. Discuta algunas fuentes de errores que afecten el resultado.
3. ¿Es posible experimentalmente que el calor absorbido por el cilindro pueda ser mayor que el trabajo realizado sobre él? Explique.
4. ¿Puede el valor de \mathcal{J} ser utilizado para determinar cuánta energía mecánica puede ser producida desde una cantidad específica de energía térmica? ¿Porqué sí o porqué no?
5. ¿Qué cree que ocurriría si cambiamos la masa \mathcal{M} que cuelga atada de la cuerda? ¿y si cambia el número de vueltas? ¿y ambos? ¿podría relacionarlos?

| Resistencia Ω | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) |
|-------------------------|---------------------------------------|
| 351.020 | 0 |
| 332.610 | 1 |
| 315.320 | 2 |
| 298.990 | 3 |
| 283.600 | 4 |
| 269.080 | 5 |
| 255.380 | 6 |
| 242.460 | 7 |
| 230.260 | 8 |
| 218.730 | 9 |
| 207.850 | 10 |
| 197.560 | 11 |
| 187.840 | 12 |
| 178.650 | 13 |
| 169.950 | 14 |
| 161.730 | 15 |
| 153.950 | 16 |
| 146.580 | 17 |
| 139.610 | 18 |
| 133.000 | 19 |
| 126.740 | 20 |
| 120.810 | 21 |
| 115.190 | 22 |
| 109.850 | 23 |
| 104.800 | 24 |
| 100.000 | 25 |
| 95.447 | 26 |
| 91.126 | 27 |
| 87.022 | 28 |
| 83.124 | 29 |
| 79.422 | 30 |
| 75.903 | 31 |
| 72.560 | 32 |
| 69.380 | 33 |
| 66.356 | 34 |
| 63.480 | 35 |
| 60.743 | 36 |
| 58.138 | 37 |
| 55.658 | 38 |
| 53.297 | 39 |
| 51.048 | 40 |
| 48.905 | 41 |
| 46.863 | 42 |
| 44.917 | 43 |
| 43.062 | 44 |
| 41.292 | 45 |
| 39.605 | 46 |
| 37.995 | 47 |
| 36.458 | 48 |
| 34.991 | 49 |
| 33.591 | 50 |

| Resistencia Ω | Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) |
|-------------------------|---------------------------------------|
| 32.253 | 51 |
| 30.976 | 52 |
| 29.756 | 53 |
| 28.590 | 54 |
| 27.475 | 55 |
| 26.409 | 56 |
| 25.390 | 57 |
| 24.415 | 58 |
| 23.483 | 59 |
| 22.590 | 60 |
| 21.736 | 61 |
| 20.919 | 62 |
| 20.136 | 63 |
| 19.386 | 64 |
| 18.668 | 65 |
| 17.980 | 66 |
| 17.321 | 67 |
| 16.689 | 68 |
| 16.083 | 69 |
| 15.502 | 70 |
| 14.945 | 71 |
| 14.410 | 72 |
| 13.897 | 73 |
| 13.405 | 74 |
| 12.932 | 75 |
| 12.479 | 76 |
| 12.043 | 77 |
| 11.625 | 78 |
| 11.223 | 79 |
| 10.837 | 80 |
| 10.467 | 81 |
| 10.110 | 82 |
| 9.767,20 | 83 |
| 9.437,70 | 84 |
| 9.120,80 | 85 |
| 8.816,00 | 86 |
| 8.522,70 | 87 |
| 8.240,60 | 88 |
| 7.969,10 | 89 |
| 7.707,70 | 90 |
| 7.456,20 | 91 |
| 7.214,00 | 92 |
| 6.980,60 | 93 |
| 6.755,90 | 94 |
| 6.539,40 | 95 |
| 6.330,80 | 96 |
| 6.129,80 | 97 |
| 5.936,10 | 98 |
| 5.749,30 | 99 |
| 5.569,30 | 100 |

NOTA: Este trabajo fue originalmente realizado por los ingenieros Alicia Oliva, Hugo Cogliati, Raúl Villoria y la señorita Belén Grassini, todos integrantes del grupo de investigación del proyecto "Aplicaciones de Nuevas Tecnologías Educativas en el Laboratorio de Física II". Posteriormente fue ampliado por la ingeniera Sandra Silvester, también integrante del mencionado grupo, para sus alumnos de la cátedra de Física II.