

# DEPARTAMENTO DE FÍSICA

## PRÁCTICA DE LABORATORIO: EQUIVALENTE MECÁNICO DEL CALOR<sup>†\*</sup>

(enero de 1994)

---

\*Elaborado por: Antonio Jáuregui y Arturo Rosas B.

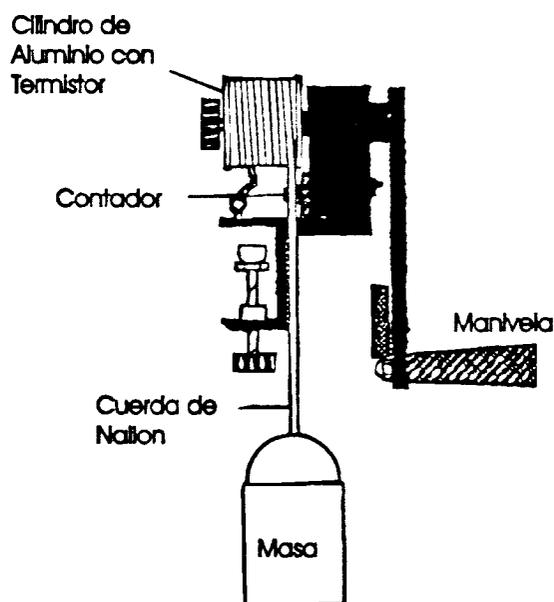
## Introducción

El principio de conservación de la energía dice que si una cantidad de trabajo se transforma completamente en calor, la energía térmica resultante habrá de ser equivalente a la cantidad de trabajo que se realizó. Normalmente, el trabajo se mide en unidades de Joules y la energía térmica en unidades de Calorías, por lo cual la equivalencia entre energía térmica y trabajo mecánico no es inmediata. Para establecer la equivalencia se requiere de una relación entre Joules y Calorías llamada constante del Equivalente Mecánico del Calor, dada por

$$1\text{caloría} = 4.186\text{Joules}$$

La presente práctica de laboratorio tiene como objetivo medir esta relación constante.

El aparato para determinar la constante del Equivalente Mecánico del Calor está mostrado en la figura. Consta de: Un cilindro de aluminio con una manivela en el extremo; una cuerda de nailon, la cual se enrolla parcialmente alrededor del cilindro de tal manera que, conforme la manivela da vuelta, la fricción entre el cilindro y la cuerda es la requerida para soportar un peso conocido que cuelga del otro extremo de la cuerda, esto asegura que la torca que actúa sobre el cilindro es constante y conocida; un contador, que nos permite conocer el número de vueltas que da la manivela; un termistor, que es un dispositivo que cambia su resistencia eléctrica cuando cambia su temperatura, se encuentra embebido en el aluminio del cilindro de tal forma que, midiendo su resistencia, podemos determinar la temperatura del cilindro.



La idea central del experimento es la siguiente:

Cuando la manivela da vuelta, la fricción entre el cilindro y la cuerda convierte el trabajo mecánico en energía térmica que eleva la temperatura del cilindro. Monitoreando los cambios de temperatura del cilindro podemos calcular la energía térmica transferida al mismo. Conocida la torca constante sobre el cilindro y el

número de vueltas que damos a la manivela podemos calcular el trabajo mecánico realizado. Finalmente el cociente de estas dos cantidades determina  $J$ , la constante del Equivalente Mecánico del Calor.

---

## Equipo

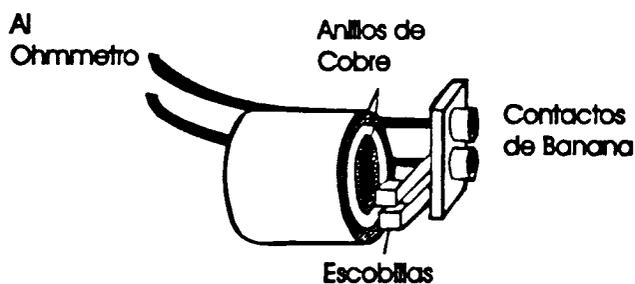
Para realizar la práctica se requiere, además del aparato del Equivalente Mecánico del Calor, lo siguiente:

1. Un Ohmmetro digital, para medir la resistencia del termistor embebido en el cilindro de aluminio
2. Hielo, para enfriar el cilindro de aluminio a una temperatura del orden de  $12^{\circ}\text{C}$  por abajo de la temperatura ambiente.
3. Un peso conocido del orden de Kilogramos, el cual será suspendido de la cuerda de nailon.
4. Una balanza, para medir el peso que colgará de la cuerda.
5. Un vernier, para medir el diámetro del cilindro de aluminio y de la cuerda. Los valores aproximados son: diámetro del cilindro,  $4.763 \pm 0.02$  cms; masa del cilindro,  $200 \pm 1.5$  gramos; diámetro del cilindro incluida la cuerda de nailon,  $4.94 \pm 0.05$  cms. Estos valores pueden ser usados, pero es mejor obtener sus propios valores midiendo los parámetros correspondientes.

---

## El termistor

Con el propósito de medir la temperatura del cilindro, un termistor se encuentra embebido dentro del aluminio. Como ya se mencionó, un termistor es una resistencia eléctrica dependiente de la temperatura; si la resistencia del termistor es conocida, su temperatura puede ser determinada con mucha precisión y confiabilidad. Las terminales del termistor están soldadas a los anillos de cobre por un lado del cilindro de tal manera que las escobillas proporcionan un contacto eléctrico entre el termistor y los contactos de banana, como se muestra en la figura. Conectando el Ohmmetro en estos contactos, la resistencia del termistor, y por lo tanto su temperatura, pueden ser monitoreados, aun cuando el cilindro esté dando vueltas. Para conocer la temperatura es necesario usar una tabla de resistencia contra temperatura, como la que se encuentra al final de este manual.



# Experimento

## Cuidados en la operación:

Es muy conveniente que al operar el equipo tome usted las siguientes precauciones:

1. Antes de llevar a cabo el experimento impregne ligeramente la superficie del cilindro con grafito.

El grafito asegura que la cuerda se desliza suavemente sobre el cilindro, garantizando con ello que la torca sea constante, y disminuye el desgaste del cilindro. Después de algunas aplicaciones la cuerda quedará impregnada y no será necesario aplicar el grafito en cada ocasión.

2. Asegúrese de instalar el aparato del Equivalente Mecánico del Calor sobre una mesa nivelada.

Si el aparato no está a nivel, la cuerda tenderá a resbalar y a juntarse sobre un extremo del cilindro impidiendo que la torca sea constante.

3. Cuide que el peso no quede suspendido más de 3 cms. sobre el piso.

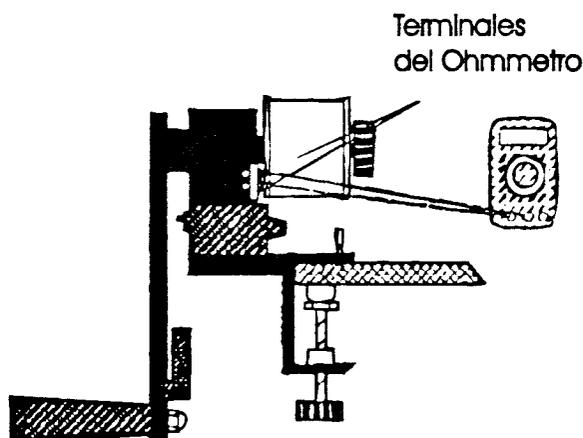
Esto se hace con el propósito de evitar una caída brusca del peso que pueda dañar el equipo.

## Desarrollo del experimento

Para llevar a cabo el experimento siga con cuidado los siguientes pasos:

1. Remueva el cilindro de aluminio del aparato del Equivalente Mecánico del Calor, para ello desenrosque con la mano el tornillo negro que lo sujeta. Mida y registre  $m$ , la masa del cilindro de aluminio. Con el vernier, mida y registre  $D_1$ , el diámetro del cilindro de aluminio.

2. Asegure el aparato en el extremo de una mesa a nivel, como se muestra en la figura.



3. Registre la temperatura ambiente; para ello, con el Ohmmetro mida la resistencia del termistor del cilindro y use la tabla de resistencia contra temperatura para determinar esta última.<sup>1</sup>

4. Ponga a enfriar el cilindro. Coloque el cilindro sobre una bolsa con hielo para bajar su temperatura al menos  $12^{\circ}C$  abajo de la temperatura ambiente.

<sup>1</sup>Al final de este manual se encuentra la tabla, una tabla más concisa se encuentra sobre el aparato, se recomienda el uso de la primera.

El cilindro es enfriado de tal manera que, cuando se calienta por fricción, el punto medio de las temperaturas alta y baja será la temperatura ambiente. En la primera mitad del experimento un poco de calor será transferido del aire al cilindro, que está más frío. Cuando el cilindro esté más caliente que el aire el calor se transferirá de regreso del cilindro a la atmósfera. Cuidando que el cambio de temperatura del cilindro sea simétrico alrededor de la temperatura ambiente, la cantidad de calor transferida del aire al cilindro y de éste al aire será aproximadamente igual y los dos efectos se equilibran.

Mientras el cilindro se enfría, planee el experimento. Es muy conveniente que la temperatura inicial del cilindro en el experimento sea de  $7^{\circ} - 9^{\circ}C$  abajo de la temperatura ambiente, y la temperatura final sea la misma cantidad sobre la temperatura ambiente. Por lo tanto, usando como dato la temperatura ambiente, determine y registre las temperaturas inicial y final que desea que el cilindro alcance durante el experimento.

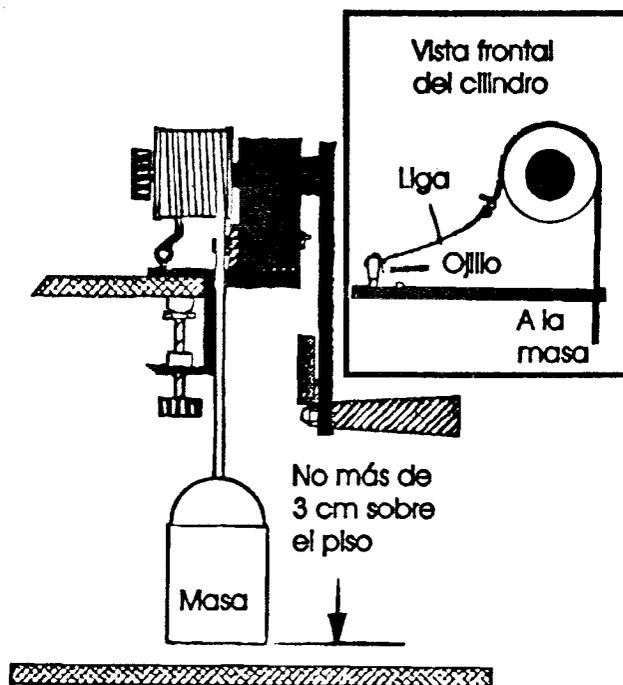
5. Mediante la tabla de resistencia contra temperatura del termistor, determine el valor de la resistencia que corresponde a cada una de sus temperaturas registradas. También registre la resistencia que corresponde a  $1^{\circ}C$  abajo de la temperatura final, este registro le permitirá tomar precauciones para frenar el movimiento de la manivela y conseguir que la temperatura final sea la que se planeó.

6. Cuando el cilindro esté suficientemente frío colóquelo en el aparato. Para ello: Confirme que los anillos de cobre apuntan hacia la manivela; asegúrese de que las estrías del cilindro encajan correctamente en los pasadores del eje de la manivela; fije el cilindro con el tornillo negro.

7. Conecte las terminales del Ohmmetro en los contactos de banana, como se muestra en la figura anterior. Coloque el Ohmmetro en un rango apropiado a la resistencia del termistor, correspondiendo al rango de temperatura considerado.

8. Enrolle la cuerda de nailon alrededor del cilindro (4-6 vueltas son suficientes) como se muestra en la siguiente figura. Asegurese que la cuerda descansa con su parte plana sobre el cilindro y cuelga hacia abajo por la ranura de la base del aparato.

Cuando el cilindro está frío, el vapor de agua puede condensarse sobre su superficie, seque la superficie con un papel absorbente antes de enrollar la cuerda, de esa manera evitará que parte del calor se pierda en evaporar el agua condensada.



9. Ate el extremo que cuelga de la cuerda al peso conocido. Ate al extremo superior de la cuerda una liga de hule y el otro extremo de la liga átelo al ojillo que se encuentra en la base del aparato. Coloque el recipiente con el peso conocido sobre el piso exactamente bajo el extremo libre de la cuerda, jale un poco ésta y átela al recipiente. Asegúrese de que, con la manivela girando, el recipiente con el peso no quede arriba de 3 cms sobre el piso.

10. Coloque el contador en ceros.

11. Observe con cuidado el Ohmmetro. Cuando la resistencia alcance el valor que corresponde a la temperatura de partida del experimento, comience a girar la manivela. Asegúrese de que, con la manivela girando, el recipiente con el peso no quede arriba de 3 cms sobre el piso. Continúe girando rápidamente la manivela hasta que la temperatura indicada por el termistor sea  $1^{\circ}\text{C}$  abajo de la temperatura final planeada, entonces gire la manivela lentamente al mismo tiempo que observa el Ohmmetro. Cuando la temperatura alcance el valor final deje de girar la manivela. Continúe observando el Ohmmetro hasta que la resistencia del termistor alcanza el mínimo (temperatura máxima). Registre la temperatura más alta obtenida como la temperatura final del experimento.

11. Registre el número  $N$  de vueltas de la manivela, es el número en el contador.

13. Ahora, mida y registre  $D_2$ , el diámetro del cilindro incluyendo el grosor adicional por la cuerda, como se usó en el experimento.

---

## Cálculos

**Cálculo de  $W$ , el trabajo mecánico.**

El trabajo mecánico realizado sobre el cilindro cuando giramos la manivela es igual al producto de la torca sobre el cilindro  $\tau$  por  $\theta$ , el ángulo total recorrido por

el cilindro. Como el movimiento del cilindro es más o menos constante durante el experimento, la torca proporcionada por la manivela habrá de balancear la torca proporcionada por la fricción de la cuerda, por lo tanto:

$$\tau = MgR$$

donde  $M$  es la masa que cuelga de la cuerda,  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $R$  es el radio del cilindro más la mitad del grosor de la cuerda. Asumimos que la fuerza aplicada por la cuerda sobre el cilindro actúa a través del centro de la cuerda.  $R$  se calcula como:

$$R = \frac{1}{4}(D_1 + D_2)$$

donde  $D_1$  es el diámetro del cilindro de aluminio y  $D_2$  es el diámetro del cilindro incluida la distancia agregada por el grosor de la cuerda. Por lo tanto,  $(D_1 + D_2)/2$  es el promedio de estos valores y la mitad del diámetro promedio es el radio desde el centro del cilindro a la mitad de la cuerda. Con esto la torca puede ser calculada como

$$\tau = \frac{1}{4}Mg(D_1 + D_2)$$

Cada vez que la manivela da una vuelta completa, esta torca se aplica sobre el cilindro a través de un ángulo  $2\pi$ . El trabajo total efectuado en  $N$  vueltas es:

$$W = \tau\theta = \frac{1}{4}Mg(D_1 + D_2)(2\pi N)$$

donde  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$  es la aceleración de la gravedad.

#### Cálculo de $H$ , el calor producido.

El calor ( $H$ ) producido por la fricción contra el cilindro de aluminio puede ser determinado a partir del cambio de temperatura del cilindro mediante la relación:

$$H = mc(T_f - T_i)$$

donde  $m$  es la masa del cilindro;  $c$  es el calor específico del aluminio igual a  $0.220 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ ;  $T_f$  es la temperatura final del cilindro; y  $T_i$  es la temperatura inicial, exactamente antes de comenzar a girar la manivela.

#### Cálculo de $J$ , la constante del Equivalente Mecánico del Calor.

La constante  $J$  se obtiene dividiendo el trabajo mecánico realizado ( $W$ ) entre el calor producido ( $H$ ), por lo tanto:

$$J = \frac{W}{H}$$

el resultado de su experimento debe caer en el rango  $4.186 \pm 0.2$ , si no es el caso, repita el experimento.

---

## Sugerencias para el reporte.

Incorpore al reporte de su experimento comentarios acerca de lo siguiente:

1. Compare su valor de  $J$  con el valor de su libro de texto. ¿Difieren?. ¿En que porcentaje?
2. Discuta las fuentes de error que considere que afectan sus resultados. ¿Algunas de ellas pueden ser evitadas?. ¿Puede estimar la magnitud de los efectos?
3. ¿Es posible que el calor absorbido por el cilindro sea mayor que el trabajo mecánico realizado sobre él?
4. ¿Puede ser usado su valor de  $J$  para determinar cuánta energía mecánica se produce a partir de una cantidad dada de energía térmica?
5. ¿Cuál es el papel de la liga de hule en el experimento?
6. ¿Tiene sentido hablar de equivalente eléctrico del calor?
7. ¿Qué ocurre si calentamos el cilindro con otra fuente de energía?, luminosa, por ejemplo. ¿Depende el resultado del experimento de cuál es la fuente de energía que provoca el cambio de temperatura en el cilindro?

---

## Apéndice.

**Ley de enfriamiento de Newton.** Un cuerpo en contacto con un medio cambia su temperatura con una rapidez proporcional a la diferencia entre su temperatura y la del medio que le rodea, ésta es la ley de enfriamiento de Newton. Si  $T(t)$  representa la temperatura del cuerpo al tiempo  $t$  y  $M$  la del medio que le rodea, la ley anterior se expresa matemáticamente mediante la ecuación

$$\frac{dT(t)}{dt} = -k(T - M)$$

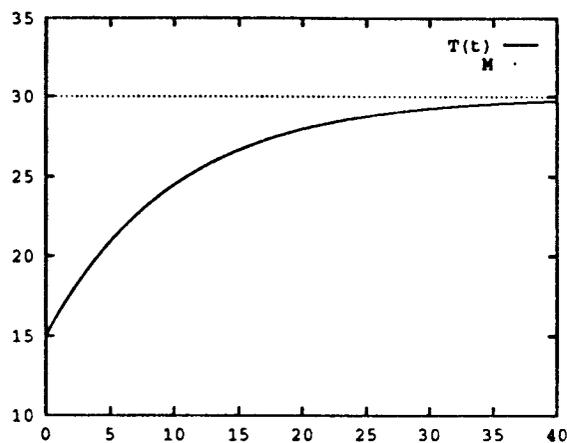
donde  $k$  es una constante positiva, que depende del cuerpo y de las características del medio, y el signo negativo toma en cuenta que la temperatura del cuerpo disminuye cuando  $T > M$ . La ecuación anterior nos proporciona la temperatura del cuerpo para todo tiempo  $t$ :

$$T(t) = T_0 e^{-kt} + M(1 - e^{-kt})$$

donde  $T_0$  representa la temperatura del cuerpo en el instante inicial:

$$T_0 = T(t = 0)$$

La siguiente figura muestra el comportamiento en el tiempo de un cuerpo con temperatura inicial de  $15^{\circ}C$ , temperatura del medio de  $30^{\circ}C$  y constante de decaimiento  $k = 0.1$ , en unidades de  $\text{min}^{-1}$ .



**Problema.** Determine la constante de decaimiento del cilindro de aluminio del aparato del Equivalente Mecánico del Calor. Para ello, sugerimos que realice los siguientes pasos:

1. Ponga a enfriar el cilindro de aluminio hasta una temperatura alrededor de  $15^{\circ}\text{C}$  abajo de la temperatura ambiente.
2. Determine la temperatura ambiente.
3. Coloque el cilindro en el aparato del Equivalente Mecánico del Calor.
4. Use el Ohmmetro y un cronómetro para monitorear la resistencia del termistor del cilindro a intervalos de tiempo regulares; por ejemplo, cada minuto, en este caso su valor de  $k$  resultará en unidades de  $\text{min}^{-1}$ .
5. Use la tabla de resistencia contra temperatura del termistor y alguna forma de interpolación, como la lineal, que se indica abajo, para determinar la temperatura del cilindro que corresponde a cada uno de sus datos.
6. Note que de la expresión para  $T(t)$  se sigue la relación:

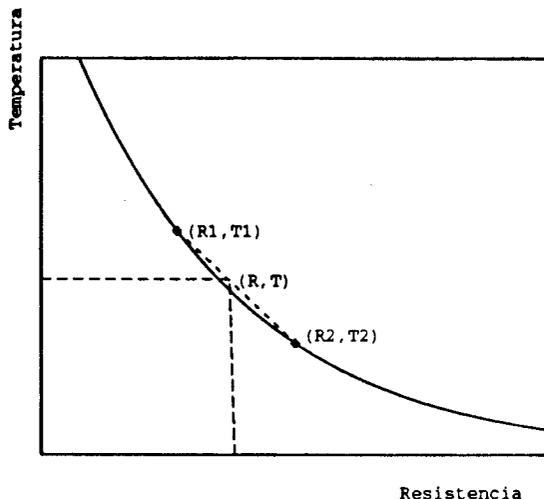
$$\ln |T(t) - M| = -kt + \ln |T_0 - M|$$

por lo tanto, una gráfica de  $\ln |T(t) - M|$  contra  $t$  es una recta cuya pendiente es  $k$ .

7. Use sus datos para graficar la recta indicada en el punto anterior y concluya, calculando la pendiente, la constante  $k$  del cilindro. Su resultado deberá ser aproximadamente  $0.033 \text{ min}^{-1}$ .

¿Cuál es el significado físico de la constante  $k$ ?

**Interpolación lineal.** Para determinar el valor de la temperatura que corresponde a una resistencia que cae dentro de dos valores contiguos de la tabla se puede usar, entre otros, la interpolación lineal. Esta consiste en conectar los puntos conocidos mediante una recta y a partir de ahí inferir el valor buscado. En la gráfica siguiente los valores conocidos corresponden a los puntos  $(R_1, T_1)$  y  $(R_2, T_2)$  y la recta hipotética se encuentra señalada.



Se sigue de la gráfica que el valor de la temperatura que corresponde a la resistencia  $R$  está dado por:

$$T = T_1 - \frac{R - R_1}{R_2 - R_1}(T_1 - T_2)$$

considerando que los puntos son contiguos, y que por lo tanto sus temperaturas difieren por un grado,  $T_1 - T_2 = 1$ , la expresión anterior se reduce a:

$$T = T_1 - \frac{R - R_1}{R_2 - R_1}$$

---

## Bibliografía

Para preparar esta práctica y elaborar el reporte correspondiente se recomienda leer el tema "Equivalente Mecánico del Calor" en los siguientes libros:

1. Física, Parte 1, R. Resnick y D. Halliday.  
Editorial CECSA (1991), pag. 498.
2. Física: Fundamentos y aplicaciones, Vol II, R. Eisberg y L. Lerner.  
Editorial McGraw Hill (1985), pag. 811.
3. Física para ciencias e ingeniería, Vol I, J. McKelvey y H. Grotch.  
Editorial Harla (1980), pag. 471.
4. Introducción a la termodinámica clásica, L. García-Colín.  
Editorial Trillas (1986).
5. Termodinámica, E. Piña Garza.  
Editorial Limusa (1978).

†En la elaboración de esta guía se usó el documento:  
Mechanical equivalent of heat, PASCO scientific.

Tabla de Resistencia contra Temperatura  
del Termistor

Res. ( $\Omega$ )	Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Res. ( $\Omega$ )	Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Res. ( $\Omega$ )	Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )
351,020	0	66,356	34	16,689	68
332,640	1	63,480	35	16,083	69
315,320	2	60,743	36	15,502	70
298,990	3	58,138	37	14,945	71
283,600	4	55,658	38	14,410	72
269,080	5	53,297	39	13,897	73
255,380	6	51,048	40	13,405	74
242,460	7	48,905	41	12,932	75
230,260	8	46,863	42	12,479	76
218,730	9	44,917	43	12,043	77
207,850	10	43,062	44	11,625	78
197,560	11	41,292	45	11,223	79
187,840	12	39,605	46	10,837	80
178,650	13	37,995	47	10,467	81
169,950	14	36,458	48	10,110	82
161,730	15	34,991	49	9,767.2	83
153,950	16	33,591	50	9,437.7	84
146,580	17	32,253	51	9,120.8	85
139,610	18	30,976	52	8,816.0	86
133,000	19	29,756	53	8,522.7	87
126,740	20	28,590	54	8,240.6	88
120,810	21	27,475	55	7,969.1	89
115,190	22	26,409	56	7,707.7	90
109,850	23	25,390	57	7,456.2	91
104,800	24	24,415	58	7,214.0	92
100,000	25	23,483	59	6,980.6	93
95,447	26	22,590	60	6,755.9	94
91,126	27	21,736	61	6,539.4	95
87,022	28	20,919	62	6,330.8	96
83,124	29	20,136	63	6,129.8	97
79,422	30	19,386	64	5,936.1	98
75,903	31	18,668	65	5,749.3	99
72,560	32	17,980	66	5,569.3	100
69,380	33	17,321	67		