

# LA TEMPERATURA Y SU MEDIDA

## 1.- Concepto de temperatura

Las conocidas sensaciones de calor y frío se expresan con adjetivos tales como fresco, tibio, cálido, caliente, etc. Cuando tocamos un objeto, utilizamos nuestro *sentido de la temperatura* para atribuirle una propiedad denominada *temperatura*, que determina si se percibe caliente o frío al tacto. Cuanto más caliente se percibe, más alta es la temperatura. Sin embargo, para definirla cuantitativamente, hemos de hacerlo mediante métodos independientes de nuestras percepciones sensoriales de calor o frío y que impliquen cantidades objetivamente mensurables. En los siguientes párrafos se explicará cómo puede hacerse esto.

Antes de tratar el concepto de *temperatura* de una forma cuantitativa y precisa, observamos que existen numerosos sistemas simples en los cuales una propiedad mensurable del sistema varía cuando éste se enfría o calienta. Un ejemplo sencillo es el de un líquido, como el mercurio o el alcohol, contenido en un bulbo unido a un tubo muy delgado, como el ilustrado en la Figura 1. La cantidad significativa que caracteriza el estado de este sistema es la longitud  $L$  de la columna líquida, medida a partir de un punto fijado arbitrariamente. A medida que el sistema se calienta, el líquido asciende por el tubo y  $L$  aumenta. Otro sistema sencillo es el de una cantidad de gas encerrado en un recipiente de volumen constante, ilustrado en la misma Figura. La presión  $p$ , medida por un manómetro, aumenta o disminuye a medida que el gas se calienta o enfría. Un tercer ejemplo es la resistencia eléctrica  $R$  de un alambre que también varía con el calor o el frío. En cada uno de estos ejemplos, a la cantidad que describe el estado de variación del sistema, como la longitud  $L$ , la presión  $p$  o la resistencia  $R$ , se la denomina *coordenada de estado* del sistema.

Consideremos el conjunto tubo-líquido como el sistema  $A$  y al gas encerrado en el recipiente como el sistema  $B$ . Entonces la coordenada de estado del sistema  $A$  es  $L$  y la del  $B$  es  $p$ . Al poner en contacto los sistemas  $A$  y  $B$ , por lo general sus coordenadas de estado cambian. Cualitativamente, decimos que inicialmente uno está más caliente que el otro y que cada sistema cambia el estado del otro. Pero si ambos sistemas se separan con un material aislante, como madera, espuma de plástico o fibra de vidrio, su interacción es mucho más lenta. Generalizando esta observación, postulamos la existencia de una pared aislante *ideal*, que denominamos *pared adiabática*. Las coordenadas de estado de dos sistemas situados en los lados opuestos de una pared adiabática no interactúan en absoluto, por lo que pueden variar independientemente. Tal pared es un modelo ideal que puede conseguirse

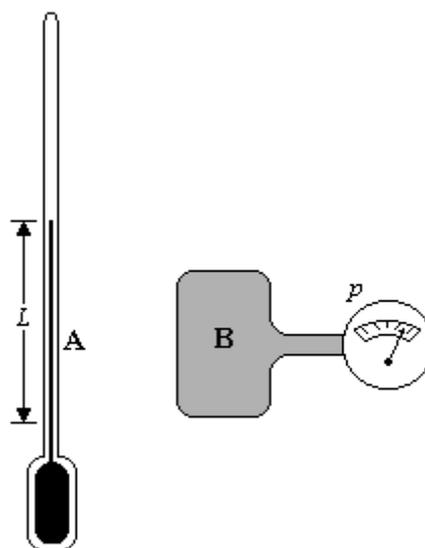


Figura 1

aproximadamente en el mundo real. En la Figura 2 se representa una pared adiabática por una región gruesa sombreada.

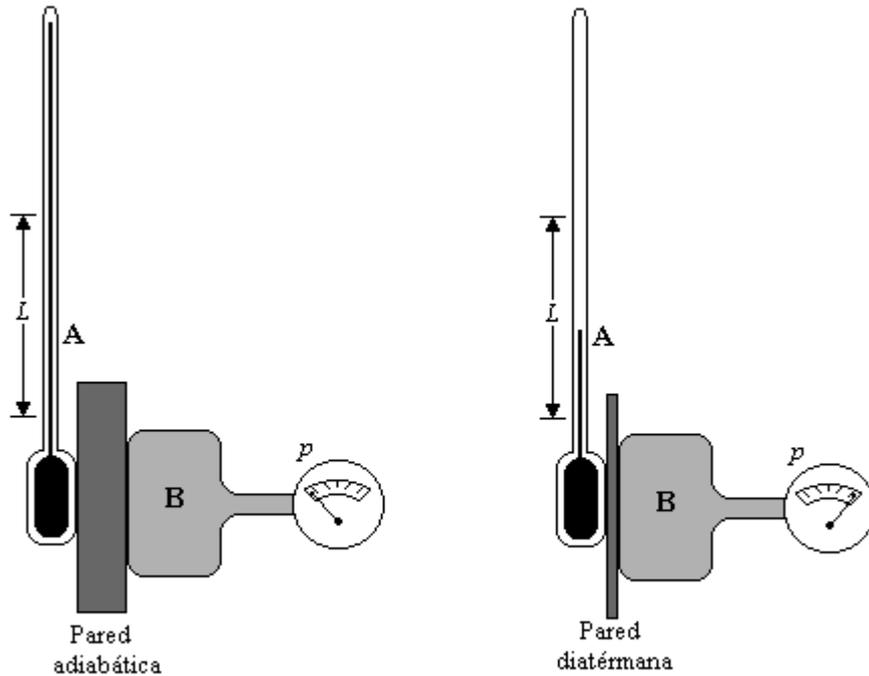


Figura 2

Lo opuesto a una pared adiabática es una división que permite a dos sistemas situados en lados opuestos influenciarse mutuamente; esta pared se denomina *pared diatérmica*. Puede utilizarse como pared diatérmica una lámina de material conductor del calor, como cobre o aluminio. En la Figura 2 se representa como una región delgada sombreada.

Cuando los sistemas A y B se ponen por primera vez en contacto real o se separan por una pared diatérmica, sus coordenadas de estado pueden variar o no. Finalmente, puede alcanzarse un estado en el que ya no se produce ningún cambio ulterior de las coordenadas de A y B. El estado común a ambos sistemas, que existe cuando han cesado todos los cambios en las coordenadas se denomina *equilibrio térmico*. Supongamos ahora dos sistemas A y B separados por una pared adiabática, pero ambos en contacto con un tercer sistema C, mediante paredes diatérmicas. Todo el conjunto está rodeado por una pared adiabática, como se muestra en la Figura 3. Los experimentos demuestran

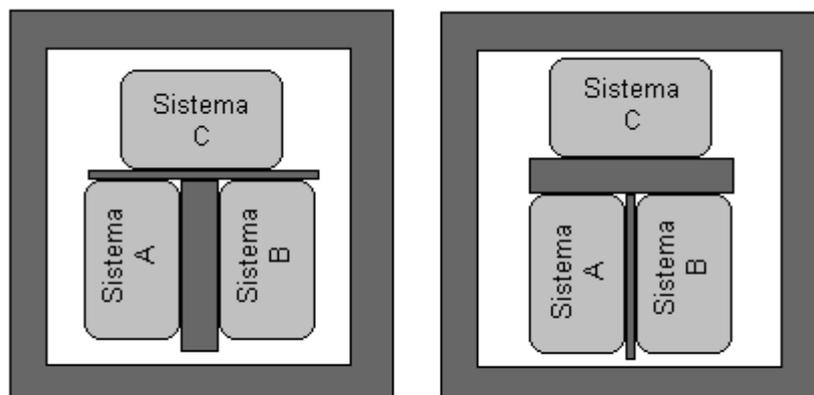


Figura 3

que los dos sistemas alcanzarán el equilibrio térmico con el tercero, y que no tendrá lugar ningún cambio ulterior si se retira la pared adiabática y se sustituye por una pared diatérmica, como se ilustra en la misma figura. Si, en lugar de permitir que ambos sistemas *A* y *B* alcancen el equilibrio con *C* al mismo tiempo, hacemos que se alcance primero el equilibrio entre *A* y *C*, y después entre *B* y *C* (siendo el estado del sistema *C* el mismo en ambos casos), entonces, al poner *A* y *B* en comunicación mediante una pared diatérmica, se encontrará que están en equilibrio térmico. Utilizaremos la expresión de que «dos sistemas están en equilibrio térmico» para indicar que ambos sistemas están en estados tales que, si se conectaran a través de una pared diatérmica, el sistema constituido por ambos estaría en equilibrio térmico.

Estos hechos experimentales pueden resumirse en la forma siguiente: *Dos sistemas en equilibrio térmico con un tercero están en equilibrio térmico entre sí.* Este principio se denomina *Ley cero de la Termodinámica* y aunque pueda parecer evidente, ha de ser verificado por la experimentación.

Pero, ¿qué determina si los sistemas *A* y *B* están o no en equilibrio térmico? Lo determina una propiedad denominada *temperatura*. *La temperatura de un sistema es aquella propiedad que determina si éste se encuentra o no en equilibrio térmico con otros sistemas.* Cuando dos o más sistemas se encuentran en equilibrio térmico, se dice que tienen la misma temperatura.

La temperatura de un sistema puede representarse por un número. Establecer una escala de temperaturas es simplemente cuestión de adoptar un conjunto de reglas que asignen números a temperaturas. Una vez hecho esto, la condición para que dos sistemas se encuentren en equilibrio térmico es que tengan la misma temperatura. Cuando las temperaturas de dos sistemas son diferentes, podemos asegurar que no están en equilibrio térmico.

## **2.- Medida de la temperatura**

### Escalas basadas en dos puntos fijos

Vamos a ver el procedimiento que se puede emplear para establecer una *escala de temperaturas*. Para ello suponemos que hemos elegido un termómetro con una propiedad termométrica cualquiera que vamos a representar por *X*. Por sencillez supondremos que la variación de la propiedad termométrica es lineal con la temperatura. Cuando se establece una situación de equilibrio térmico, caracterizado por una temperatura *T*, se verifica entonces que

$$T(X) = aX + b \quad (1)$$

Para poder determinar la temperatura conociendo el valor de la propiedad termométrica es necesario obtener las constantes *a* y *b*. Necesitamos entonces dos ecuaciones. Éstas se obtienen dando un valor arbitrario a la temperatura en dos puntos con distinto valor de *X*, la propiedad termométrica. Ésta será pues, una escala basada en dos puntos. La escala más conocida de este tipo es la escala *Celsius* en la que los dos puntos elegidos para resolver el sistema anterior son el correspondiente a la temperatura en la que coexisten el hielo y el agua líquida y el correspondiente a la temperatura en la que coexisten el agua líquida y el vapor de agua. Al primero se le adjudicó un valor de *0*

y al segundo un valor de 100. Otra escala conocida es la que aún se usa en los países anglosajones llamada escala *Fahrenheit*. Enseguida veremos la relación entre estas dos escalas. Vamos a obtener ahora las constantes  $a$  y  $b$  para la escala *Celsius*. Si representamos la propiedad termométrica en el primer punto de los mencionados antes como  $X_0$  y en el segundo como  $X_{100}$ , tendremos el siguiente sistema:

$$\begin{aligned} 0 &= aX_0 + b \\ 100 &= aX_{100} + b \end{aligned} \quad (2)$$

de donde resolviendo nos queda

$$a = \frac{100}{X_{100} - X_0}; \quad b = -\frac{100X_0}{X_{100} - X_0} \quad (3)$$

y sustituyendo en la ecuación (1):

$$T = 100 \frac{X - X_0}{X_{100} - X_0} \quad (4)$$

Así, si los termómetros considerados son los de la Figura 1, donde las propiedades respectivas se representan por  $L$  y  $p$ , la temperatura vendría dada por las expresiones

$$T = 100 \frac{L - L_0}{L_{100} - L_0} \quad T = 100 \frac{p - p_0}{p_{100} - p_0}$$

En la escala de temperaturas *Celsius* la unidad es el *grado Celsius* ( $^{\circ}C$ ). En la otra escala que hemos mencionado, la *Fahrenheit*,  $T_F$  ( $^{\circ}F$ ), la temperatura del punto de fusión del hielo ( $T_C = 0$   $^{\circ}C$ ) es 32  $^{\circ}F$  y la del punto de vaporización del agua ( $T_C = 100$   $^{\circ}C$ ) es 212  $^{\circ}F$ . Los 100 grados *Celsius* que existen entre el punto de fusión y el punto de vaporización del agua corresponden a 180 grados *Fahrenheit*. Para pasar de una a otra podemos utilizar la ecuación (4), considerando por ejemplo, que la temperatura *Fahrenheit* es la propiedad termométrica. Es decir,

$$T_C = 100 \frac{T_F - 32}{212 - 32}$$

o, lo que es lo mismo,

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32) \quad (5)$$

### Escalas basadas en un solo punto fijo

En principio, parece que con estas escalas, u otras parecidas, y un termómetro calibrado de acuerdo a ellas, ya tenemos todo lo necesario para medir temperaturas. Por otra parte, es lógico pensar que cualquier termómetro que utilice la misma escala debe proporcionar el mismo valor de la temperatura cuando se den las mismas condiciones. Sin embargo, esto no es cierto cuando se usa la escala *Celsius* o cualquier otra que esté basada en los mismos dos puntos. La razón es que la temperatura a la que coexisten las fases sólida y líquida del agua y aquella a la que coexisten las fases líquida y gaseosa, varía con las condiciones en que se realiza la medida. En concreto, la temperatura varía con la presión. Como ésta varía con la zona geográfica y con las condiciones atmosféricas, es muy difícil que coincidan las lecturas de dos termómetros calibrados en distintos lugares o diferentes momentos. Esta dificultad hizo necesario establecer nuevas escalas basadas en puntos cuyas condiciones fueran fácilmente reproducibles de manera que la temperatura correspondiente a dichos puntos fuera la misma para todas las calibraciones.

Las nuevas escalas que se adoptaron están basadas en un solo punto fijo llamado *punto triple del agua* que corresponde a unas condiciones perfectamente definidas de presión y temperatura en las que pueden coexistir en equilibrio el agua líquida, el hielo y el vapor. El valor de la presión para este punto es de 4.58 mm de Hg y la temperatura convenida de 0.01 °C. Pero, ¿cómo podemos establecer una escala de temperaturas si solo disponemos de un punto fijo? Podemos conseguir esto si en la ecuación (1) hacemos  $b=0$ .

Para ilustrar cómo se establece una escala de temperaturas vamos a hacer uso de un tipo de termómetro, concretamente el termómetro de gas a volumen constante cuyo funcionamiento vamos a ver a continuación.

Entre todas las coordenadas de estado o *propiedades termométricas*, la presión de un gas encerrado en un recipiente a volumen constante es notable por su sensibilidad, precisión de medición y reproducibilidad. En la Figura 4 se representa esquemáticamente el termómetro de gas a volumen constante. El gas, generalmente helio, está contenido en un depósito, como se ve en la figura, y la presión que ejerce puede medirse mediante un manómetro de mercurio abierto. Cuando se eleva la temperatura del gas, éste se expande obligando al mercurio a bajar en el tubo A y a subir en el tubo B. Los tubos A y B están unidos por un tubo de goma. Elevando B, puede hacerse que el nivel del mercurio en A vuelva a la señal de referencia E. De este modo, el gas se mantiene a volumen constante.

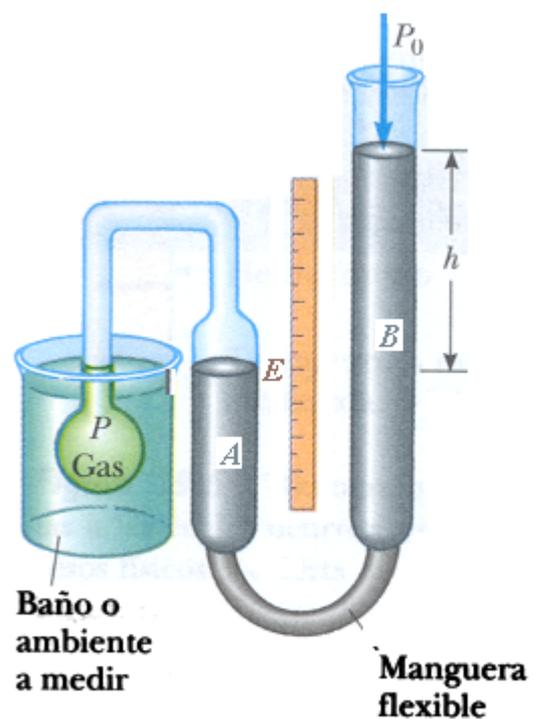


Figura 4

Los termómetros de gas se utilizan principalmente en las oficinas de normalización y en algunos laboratorios de investigación universitarios. Generalmente son grandes, voluminosos y lentos en alcanzar el equilibrio térmico.

La experiencia demuestra que si se realizan medidas de diferentes temperaturas con termómetros que contienen gases distintos se llega a la conclusión de que la lectura de los termómetros es independiente del gas utilizado, siempre que la presión del gas sea pequeña y que la temperatura a medir se encuentre suficientemente lejos del punto de licuación del gas. Pero la recta que relaciona la presión con la temperatura varía con el tipo de gas que se utilice de manera que si usamos tres gases diferentes obtendremos algo parecido a lo representado en la Figura 5. En esta figura se observa que, aunque las rectas son distintas para cada gas, al

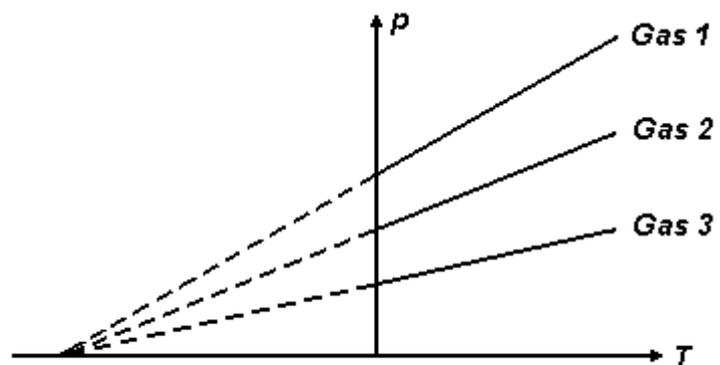


Figura 5

En esta figura se observa que, aunque las rectas son distintas para cada gas, al

extrapolarlas en el sentido de las temperaturas decrecientes, todas acaban por coincidir en un punto. Este punto es precisamente el correspondiente a la presión nula por lo que es el punto donde la temperatura es la más baja posible y se llama *cero absoluto de temperatura*.

De todo lo anterior vemos que la temperatura es proporcional a la presión y que, como queríamos, la constante  $b$  de la ecuación (1) es cero. Podemos poner entonces,

$$\frac{T}{T_0} = \frac{p}{p_0}$$

donde  $T_0$  y  $p_0$  son la temperatura y presión en el *punto triple del agua*, respectivamente. Hemos dicho antes que la temperatura del *punto triple* es por convenio  $0.01\text{ }^\circ\text{C}$ . Si ahora le damos el valor cero al *cero absoluto* y utilizamos un valor para la unidad igual al grado Celsius, la temperatura del punto triple del agua será  $273.16$ . Ésta es la escala absoluta Kelvin en la que cada división, llamada también Kelvin, es igual al grado Celsius, es decir,  $1\text{ K} = 1\text{ }^\circ\text{C}$ . Una vez que sabemos que la temperatura del punto triple es  $273.16\text{ K}$  (léase kélvines), la temperatura a cualquier presión se podrá escribir como

$$T = 273.16 \frac{p}{p_0} \quad (6)$$

Ejemplo: Supongamos que un termómetro de gas a volumen constante tiene una presión de  $1,50 \times 10^4\text{ Pa}$  en el punto triple del agua y una presión en el punto de ebullición normal de  $2,05 \times 10^4$ . ¿Cuál es la temperatura  $T_n$  en el punto de ebullición normal?

*Solución:* Según la ecuación (6),

$$T_n = 273,16 \frac{2,05 \cdot 10^4}{1,50 \cdot 10^4} = 373,32\text{ K}$$

Existe otra escala absoluta que está relacionada con la Fahrenheit de la misma manera que lo está la Kelvin con la Celsius. Es la llamada Rankine y la unidad en esta escala es equivalente a un grado Fahrenheit. En la Figura 6 están representadas las cuatro escalas.

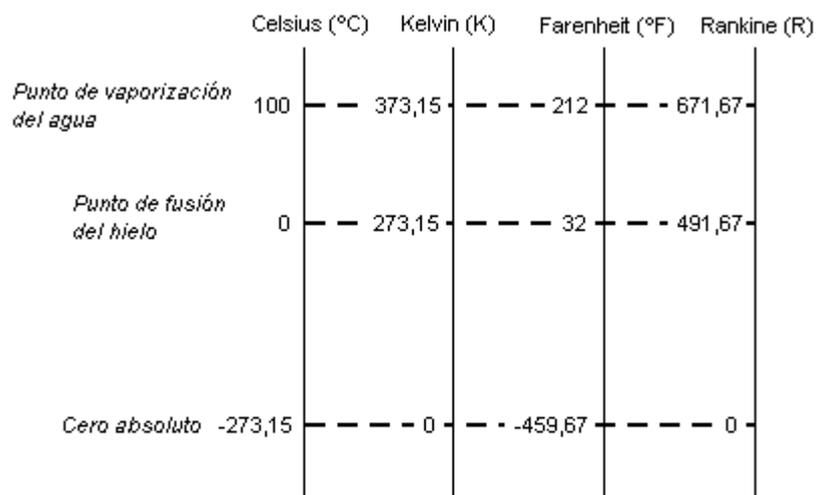


Figura 6

### 3.- Otros termómetros

Aunque el sistema ilustrado en la Figura 1 fue uno de los primeros termómetros que se emplearon, en la actualidad se utilizan otros sistemas. Las características más importantes de un termómetro son: *sensibilidad* (una variación apreciable en la coordenada de estado producida por una pequeña variación de temperatura), *precisión* en la medida de la coordenada de estado, y *reproducibilidad*. Otra propiedad deseable es la *rapidez* en alcanzar el equilibrio térmico con otros sistemas. En los párrafos siguientes se describirán los termómetros que mejor satisfacen estos requerimientos.

Un termómetro empleado mucho en laboratorios de investigación e ingeniería es el *termopar*, que se basa en la propiedad de que las uniones realizadas entre metales o aleaciones distintos en un circuito eléctrico dan lugar a una fuerza electromotriz o «voltaje» cuando están a temperaturas diferentes. En la Figura 7, *la unión de prueba* se pone en contacto con el sistema cuya temperatura desea medirse, y se mantienen las dos *uniones de referencia* a una temperatura de referencia constante, en este caso la

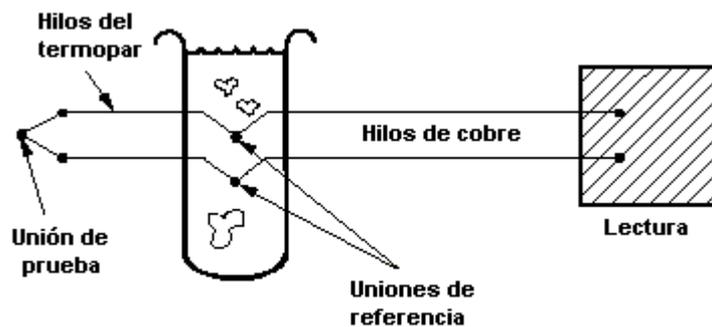


Figura 7

temperatura de fusión del hielo. A menudo, la unión de prueba se introduce en el material cuya temperatura se desea medir. Como esta unión de prueba es pequeña y tiene una masa pequeña, puede seguir fácilmente los cambios de temperatura y alcanzar rápidamente, el equilibrio.

Un termómetro eléctrico es el *termómetro de resistencia*, que se compone de una bobina de hilo delgado encerrada generalmente dentro de un tubo de plata de paredes finas que le sirve de protección. Mediante hilos de cobre se une el termómetro a un dispositivo para medir resistencias. Como la resistencia puede medirse con gran precisión, este termómetro es uno de los instrumentos más precisos para medir la temperatura. Para temperaturas extremadamente bajas, se sustituye la bobina por un pequeño cilindro de carbono o por una pequeña pieza de cristal de germanio.

Para medir temperaturas por encima del alcance de los termopares y termómetros de resistencia, se utiliza un *pirómetro óptico*, como el ilustrado esquemáticamente en la Figura 8, que consiste esencialmente en un telescopio provisto de un filtro de vidrio rojo *F* y una pequeña lámpara incandescente *L* montada en el tubo. Cuando el pirómetro se

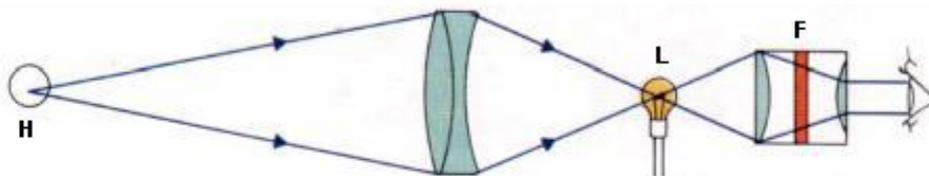


Figura 8

dirige hacia un horno  $H$ , el observador que mire a través del telescopio ve el filamento oscuro contra el fondo brillante del horno. El filamento de la lámpara está conectado a una batería y a un reóstato. Variando éste puede aumentarse gradualmente la corriente que pasa por el filamento y, por tanto, su brillo hasta que se iguala con el del fondo. Calibrando previamente el instrumento a ciertas temperaturas conocidas, puede graduarse la escala del amperímetro del circuito, para leer directamente la temperatura. Como no es necesario poner en contacto ninguna parte del instrumento con el cuerpo caliente, el pirómetro óptico puede usarse a temperaturas superiores a las de los puntos de fusión de los metales.