

# Mecanismos de transferencia de calor de un filamento de Platino

A. Chacoma & P. Casali

Instituto Balseiro  
19 de Mayo de 2011

## Resumen

Se analizó la transmisión de calor a su entorno de un filamento de platino colocado en un recinto cerrado con aire en su interior al que se le hizo circular una corriente. Se observó que la radiación y conducción a través de los soportes que sostenían al filamento eran los mecanismos predominantes cuando el aire se encontraba a presiones inferiores a 0,1 Torr. Se reconoció una fuerte dependencia de la temperatura del filamento con la presión entre 0,1 y 10 Torr. A presiones superiores se observó que la convección era más eficaz si el filamento se colocaba horizontalmente en lugar de verticalmente.

## 1. Introducción

Se entiende por transferencia de calor al intercambio de energía térmica que ocurre entre dos sistemas. Existen tres mecanismos de transmisión de calor: conducción, convección y radiación. Estos necesitan de la presencia de una diferencia de temperaturas entre los sistemas, de forma que la energía fluye del cuerpo de mayor temperatura al de menor según indica la segunda ley de la termodinámica.

La conducción requiere que los sistemas estén físicamente en contacto y no implica transferencia neta de masa. En el caso de los sólidos se debe a la transmisión de energía cinética mediante las vibraciones de las moléculas de la red cristalina en conjunto con el movimiento de los electrones libres. En los fluidos la transmisión se realiza mediante las colisiones entre las moléculas debido a sus movimientos aleatorios. La ley de Fourier establece<sup>[1]</sup>:

$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (1)$$

donde  $\vec{q}$  es la cantidad de calor transferido por unidad de tiempo y de área (densidad de flujo de calor) y su dirección es la dirección de transferencia neta,  $k$  es la conductividad del material y  $\nabla T$  es el gradiente de temperatura en el punto de estudio. La conductividad depende de la temperatura en general. En el caso unidimensional (eje  $x$ ) (1) se reduce a:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

La convección es característica de un fluido y se produce debido a la variación de su densidad con la temperatura, de modo que las masas de fluido de mayor temperatura tienden a ascender y desplazar a las masas más frías y densas. De esta forma el fluido alrededor de un cuerpo caliente circula cíclicamente y a lo largo de la vertical absorbiendo calor de este y transmitiéndolo a zonas más elevadas. La convección puede describirse mediante la ley de enfriamiento de Newton<sup>[1]</sup>:

$$P_c = h(T - T_m) \quad (3)$$

donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor,  $T$  la temperatura del cuerpo,  $T_m$  la temperatura del medio (fluido) y  $P_c$  la potencia disipada por el cuerpo por unidad de área. En general  $h$  puede depender de la diferencia de temperatura entre el medio y el cuerpo.

Cualquier cuerpo a una temperatura superior a 0 K emite radiación térmica como consecuencia de la agitación de sus moléculas. La propagación se realiza en forma de ondas electromagnéticas y no requieren de la existencia de un medio material para poder propagarse. La ley de Stefan-Boltzmann describe la transferencia por radiación<sup>[1]</sup>:

$$P_r = \sigma \epsilon(T) T^4 \quad (4)$$

donde  $P_r$  es la potencia disipada por unidad de área disipada por el cuerpo que emite radiación,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann y  $\epsilon$  es la emisividad del cuerpo que depende de su temperatura  $T$ .

La transmisión de calor por conducción en un gas depende del camino libre medio,  $\lambda$ , de las moléculas. Este se calcula como [2]:

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi d^2 p} \quad (5)$$

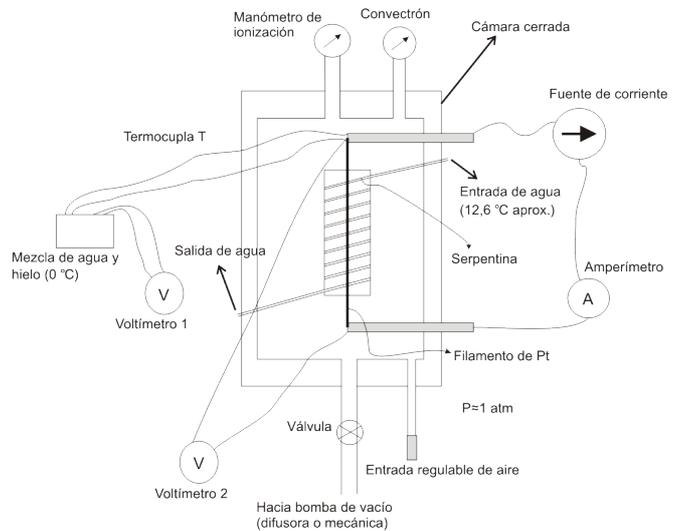
donde  $k_B$  es la constante de Boltzmann,  $T$  la temperatura del gas,  $p$  su presión y  $d$  el diámetro de las partículas que lo componen. Cuando  $\lambda$  es muy grande en relación a la longitud característica del sistema,  $l_s$ , que contiene al gas (bajas presiones) la transmisión por conducción es despreciable debido a que no hay suficientes moléculas para que la energía se transmita eficazmente. La transmisión por conducción comienza a ser notable cuando el camino libre medio es pequeño en relación a la longitud característica del sistema y en ese caso la transmisión por este mecanismo depende de la presión. A presiones muy elevadas ( $\lambda \ll l_s$ ) la conducción vuelve a ser ineficaz. Esto se debe a que  $\lambda$  es inversamente proporcional a la presión, mientras que la capacidad calorífica de un volumen determinado de gas es proporcional a la presión. De esta forma, si se coloca un cuerpo caliente en el seno del gas, a presiones muy elevadas la conducción dejará de depender de la presión ya que, a pesar de haber mayor cantidad de moléculas disponibles para transmitir energía,  $\lambda$  es lo suficientemente pequeño para evitar que las moléculas de gas colisionen eficazmente con el cuerpo.

La convección en un gas es despreciable por debajo de una cierta presión debido a que si no hay suficientes moléculas se está en régimen molecular y no se puede hablar de transporte de masas de gas. Cuando se supera esa presión y se llega al régimen viscoso la convección predomina por sobre la conducción debido a que esta deja de ser efectiva.

## 2. Método experimental

Para realizar la experiencia se usó un sistema de vacío, el cual constaba de una cámara, una bomba mecánica y una difusora. Dentro de la misma se colocó un filamento de platino de  $(1,36 \pm 0,03)\Omega$ , medido a cuatro puntas a  $(24 \pm 2)^\circ\text{C}$ . En la figura 1 se muestra en esquema del arreglo experimental utilizado.

El filamento se colocó sobre unos soportes en posición vertical y dentro de un cilindro de bronce de  $(12 \pm 1)\text{mm}$  de diámetro, rodeado por una serpentina por la cual circulaba agua a  $\sim 12,6^\circ\text{C}$ , la cual cumplía la función de homogeneizar la temperatura del medio.



**Figura 1** Arreglo experimental.

La presión dentro de la cámara fue regulada a partir de una válvula tipo aguja y en ocasiones cerrando parcialmente la válvula que conectaba con la bomba de vacío, creando de esta manera una impedancia, la cual se aprovechó para regular con mayor facilidad los valores de presión. Las mediciones de este parámetro se hicieron con un manómetro tipo Convección para presiones en el rango 1mTorr a presión atmosférica, y con el manómetro de Ionización para presiones menores a eso y hasta  $\sim 10^{-5}$  torr.

La temperatura en los soportes fue medida usando una termocupla tipo T (referida a cero grados), y la del filamento se midió colocando un voltímetro en los extremos, y viendo la variación en la resistencia a medida que se le incrementaba corriente. Para esto último se usó la tabla de calibración del sensor RTD (Resistance Temperature Detector) PT100. Dada la expresión

$\rho(T)=(L/A)R(T)$  se había medido  $R(T=24,2^{\circ}\text{C})$  se busco en tabla el valor de  $\rho(T=24,2^{\circ}\text{C})$  y se calculó  $(L/A)$  con esto se obtuvo una calibración en  $\rho$ .

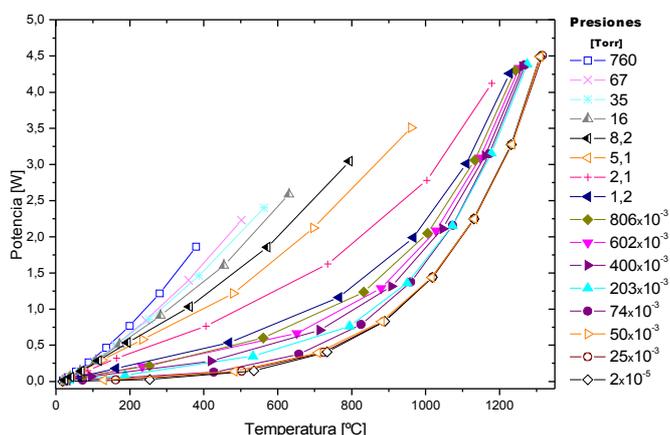
Se realizaron curvas de potencia en función de la temperatura del filamento para varios valores de presión y se estudiaron los mecanismos de disipación por radiación y conducción por el aire y los soportes, y convección. Por ultimo se colocó el filamento en posición horizontal y se realizo una medición para estudiar el peso del mecanismo de disipación por convección en las dos configuraciones.

### 3.Resultados y discusión

#### 3.1. Estudio de la potencia disipada en el filamento en función de la temperatura del mismo.

En el gráfico de la figura 2 se muestran la relación entre la potencia disipada en el filamento de platino y la temperatura del mismo a distintas presiones.

Se ve que a potencia fija, la temperatura en el filamento decrece al aumentar la presión en la cámara, esto es debido a que al haber más aire se incrementa la disipación por conducción a través de este, y por convección en el caso de las presiones más altas (régimen viscoso).



**Figura 2.** Curvas de la potencia disipada por el filamento en función de su temperatura a distintas presiones del gas que lo rodea.

En alto vacío la disipación de energía es predominantemente debido a la radiación y conducción a través de los soportes del filamento, ya que estas contribuciones son independientes de la presión. La conducción en el aire se

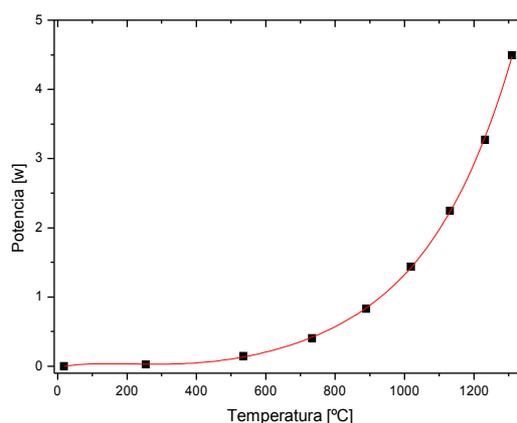
desprecia por ser la presión muy baja y la convección por encontrarse el aire en régimen molecular.

#### 3.2. Estudio del término radiativo y conductivo por los soportes.

Según la ecuación (4) el termino radiativo es función de la temperatura a la cuarta, pero se sabe que la emisividad es una función de la temperatura, por lo que se propuso como modelo para esta una relación lineal de la forma:  $\epsilon(T)=\epsilon_0(1+\gamma T)$ , donde  $\epsilon_0$  y  $\gamma$  son constantes. De este modo el termino radiativo se corrige con un termino que depende de la quinta potencia de la temperatura.

El término de conducción en los soportes es lineal con la temperatura según la ecuación (2). A partir de las medición de la temperatura de los soportes se estudió la dependencia de la temperatura del filamento con la de los soportes y se vio que esta relación se ajustaba aceptablemente con un polinomio de grado cuatro (ver apéndice 1). Entonces se infirió que la contribución debido a la conducción de los pilotes va como temperatura a la cuarta. De modo que los dos términos se comportan en conjunto como un polinomio de grado cinco.

Teniendo esto en cuenta se tomaron las mediciones realizas en alto vacío ( $\sim 2 \times 10^{-5}$  Torr) y se ajustaron con un polinomio de grado 5. En el gráfico de la figura 3 se muestran estos resultados y en la tabla 1 los parámetros del ajuste.



**Figura 3** Ajuste polinomial de la forma  $P = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 + a_5T^5$  realizado a los términos radiativo y conductivo hacia los soportes.

Parámetros	Valor
$A_0$ [Torr]	$-0,01 \pm 0,03$
$a_1$ [ $^{\circ}\text{C}^{-1}\text{Torr}$ ]	$(9 \pm 8) \times 10^{-4}$
$a_2$ [ $^{\circ}\text{C}^{-2}\text{Torr}$ ]	$(-5 \pm 4) \times 10^{-6}$
$a_3$ [ $^{\circ}\text{C}^{-3}\text{Torr}$ ]	$(1,3 \pm 0,8) \times 10^{-8}$
$a_4$ [ $^{\circ}\text{C}^{-4}\text{Torr}$ ]	$(-1,2 \pm 0,7) \times 10^{-11}$
$a_5$ [ $^{\circ}\text{C}^{-5}\text{Torr}$ ]	$(5,1 \pm 0,2) \times 10^{-15}$
$R^2$	0,99967

Tabla 1 parámetros del ajuste polinomial realizados a los términos radiativo y conductivo.

### 3.3. Estudio de la disipación por conducción en el aire

Se restó a cada una de las curvas de la figura 2 la curva obtenida en alto vacío obteniendo una familia de curvas que representaban las pérdidas por conducción y convección en el aire, pues la radiación y conducción hacia los soportes se supusieron independientes de la presión. En la figura 4 se muestran estos resultados.

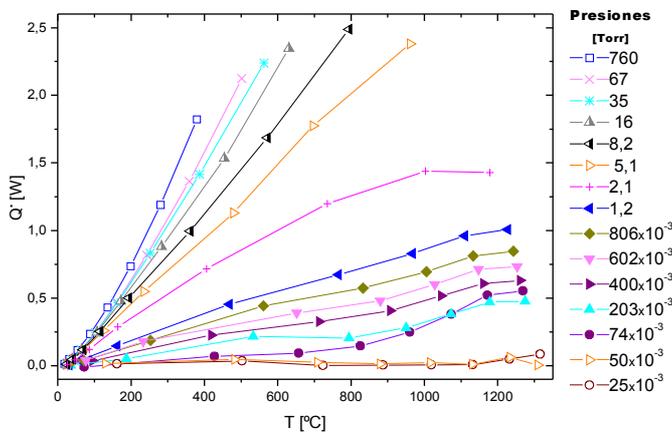


Figura 4. Curvas de la potencia disipada por el filamento,  $Q'$ , en función de su temperatura a distintas presiones del gas que lo rodea cuando se suprime las contribuciones de las disipaciones por radiación y conducción a través de los soportes.

Se observa que a una potencia fija (por ejemplo  $P \sim 0,25\text{W}$ ) y a presiones altas ( $> 5,1$  Torr) la temperatura en el filamento varía muy poco. Esto puede asociarse a que en estas presiones la disipación por conducción en el aire comienza a independizarse de la presión, lo cual está relacionado con que el camino libre medio de las moléculas comienza a ser muy pequeño comparado con el tamaño del sistema (transición a régimen viscoso). Sin embargo como en esta

zona la convección comienza a ser más eficaz, se sigue viendo una variación de la temperatura con respecto a la presión.

Además se observa que a presiones muy bajas el término por conducción en el aire es despreciable. Para presiones en el rango medio ( $\sim 74$  mTorr a 1 Torr) a potencia constante la variación de la temperatura está estrechamente ligada a la variación de presión. El estudio de este caso se presenta en el apartado siguiente.

### 3.4. Estudio de la relación entre temperatura del filamento y presión. Caracterización del manómetro tipo Pirani.

Utilizando las curvas que se muestran en la figura 2 se estimó una relación entre la temperatura del filamento y la presión de la cámara a potencias fijas (ver apéndice 2). En la figura 5 se muestran los resultados obtenidos para cuatro potencias distintas.

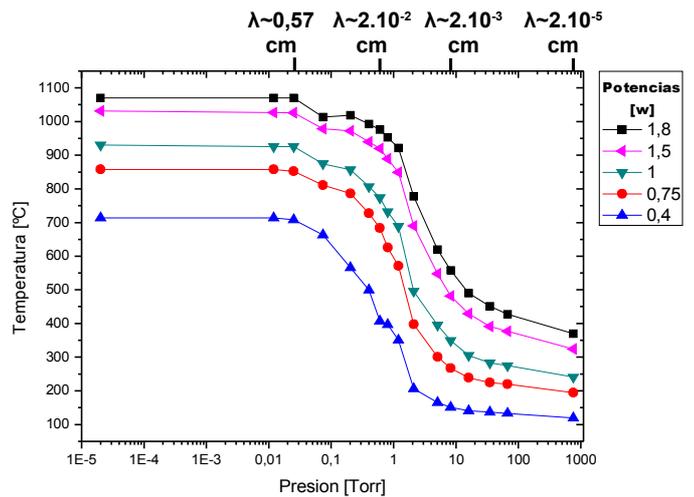


Figura 5. Temperatura del filamento en función de la presión del aire que lo rodea cuando se le suministra una potencia fija. Arriba se indica el camino libre medio.

En este pueden observarse con mayor detalle los mecanismos de disipación de energía del filamento: el término radiativo y el conductivo por los soportes domina hasta 0,1 Torr y llegada a esta presión el filamento empieza a disipar calor por conducción en el aire, lo cual depende de la presión. Cuando la presión alcanza los 10 Torr este mecanismo se hace menos eficiente y el filamento disipa la mayor parte de la energía por radiación y conducción en los soportes, a los cuales se suma la disipación por convección.

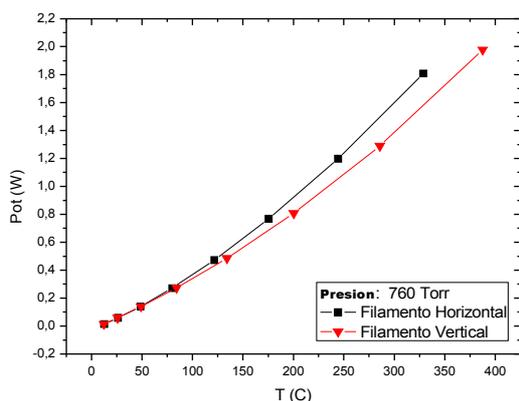
Se calculó el camino libre medio para 4 presiones características usando la ecuación (5). Se observa

que la conducción empieza a ser efectiva cuando el camino libre medio es del orden de las dimensiones del sistema (radio del cilindro).

Los manómetros tipo Pirani, utilizados para medir presiones en el rango de  $10^{-4}$  a 1Torr, basan su funcionamiento en los mecanismos de disipación de energía aquí estudiados. Básicamente se calibran a partir de curvas del tipo de la figura 5 y se obtiene un indicador de la presión en función de la temperatura del filamento.

### 3.5. Estudio de la disipación de calor por convección.

Se midió a presión atmosférica la potencia disipada por el filamento en función de la temperatura cuando el sistema se colocó de modo que el filamento estaba en posición horizontal y luego en posición vertical. De este modo se pretendió reconocer una diferencia asociada a las pérdidas por convección. En el gráfico de la figura 6 se muestran los resultados obtenidos.



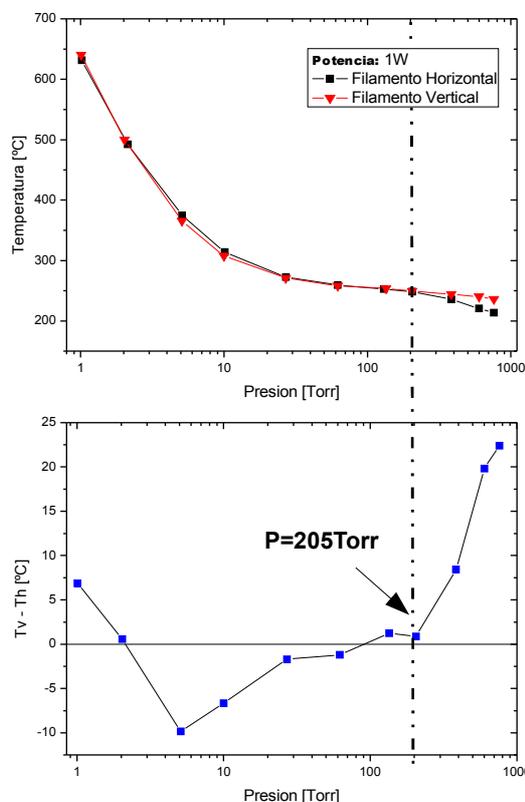
**Figura 6.** Potencia disipada por el filamento en función de su temperatura cuando se lo coloca en posición horizontal y vertical.

Se observa que para una potencia dada, el filamento alcanzaba una menor temperatura al ser colocado en posición vertical. Por ende se asocia la diferencia a que las pérdidas por convección fueron mayores con el filamento puesto en posición horizontal, pues se supone que los demás mecanismos no se relacionan con la posición del filamento.

En el gráfico de la figura 7, arriba, se muestra la temperatura en función de la presión de la cámara para las dos posiciones del filamento sometido a una potencia fija. Abajo se graficó la diferencia entre ambas curvas.

Para realizar estas mediciones se procedió de la

siguiente manera: se fijaba una presión, y se variaba la corriente en el filamento hasta que la potencia alcanzaba 1W, se dejaba estabilizar al sistema, y se medía la tensión en el filamento, dicho parámetro lo relacionábamos, como antes, con la temperatura del mismo.



**Figura 7** (arriba) Temperatura en función de la presión para el filamento puesto en posición horizontal y vertical. (abajo) diferencia entre curvas. Ambos gráficos para presiones mayores a 1 Torr y a una potencia fija de 1 W.

Se observa que a presiones superiores a los 200 Torr la temperatura del filamento horizontal sigue decreciendo con la presión, mientras que la del filamento vertical no varía significativamente.

Nuevamente se puede explicar este hecho en que la convección es más efectiva cuando el filamento es colocado en posición horizontal, pues la diferencia comienza a notarse en el régimen viscoso donde la transmisión por este mecanismo predomina.

Una posible causa de este hecho es, que al estar el filamento en posición vertical, el aire asciende a través del cilindro calentándose, de modo que llega a la parte superior del mismo con una temperatura superior a la que tenía cuando entraba al cilindro, esto provocaría una reducción en el gradiente y por ende una disminución en las pérdidas por convección, con respecto a la posición horizontal<sup>[3]</sup>.

Otra posible causa de esto, teniendo en cuenta el sistema utilizado, podría ser que cuando el filamento se coloca en posición horizontal el aire calentado asciende hacia la pared y su rápido enfriamiento crea celdas de convección en el interior del cilindro, las cuales incrementarían las pérdidas respecto de la configuración con el filamento vertical<sup>[4]</sup>.

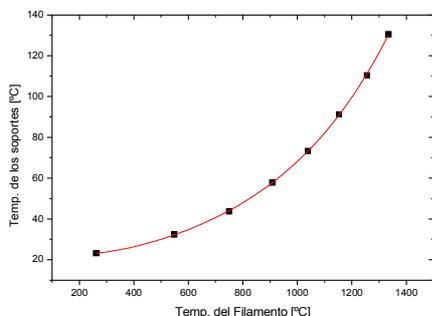
## 4. Conclusión

Se estudió la potencia disipada por un filamento de platino por el que se hizo circular una corriente variando la presión del aire que lo rodeaba. Se observó que a presiones bajas (hasta 0,1 Torr) los mecanismos que predominaban eran la conducción a través de los soportes que sostenían al filamento y la radiación. Entre 0,1 Torr y 10 Torr se verificó una considerable dependencia entre la presión y la temperatura del filamento asociada a la conducción de calor a través del aire. A presiones superiores se observó que la conducción en el aire deja de ser efectiva y comienza a predominar la convección. Estudiando las curvas de temperatura del filamento en función de la presión cuando se colocó el filamento en posición vertical y horizontal se concluyó que la convección era más efectiva con el filamento puesto horizontalmente. Esta última observación es válida para el sistema estudiado, pero podría no serlo para otro similar con algunas variaciones en la geometría.

## Apendices

### 1. Dependencia de la temperatura de los soportes con la del filamento

En el gráfico de la figura 8 se muestra la relación entre la temperatura del filamento y la temperatura de los soportes y en la tabla 2 los parámetros del ajuste.



**Figura 8** Ajuste polinomial de la forma  $T_{sop} = B_0 + B_1T + B_2T^2 + B_3T^3 + B_4T^4$  a la relación entre temperatura del filamento y temperatura de los soportes.

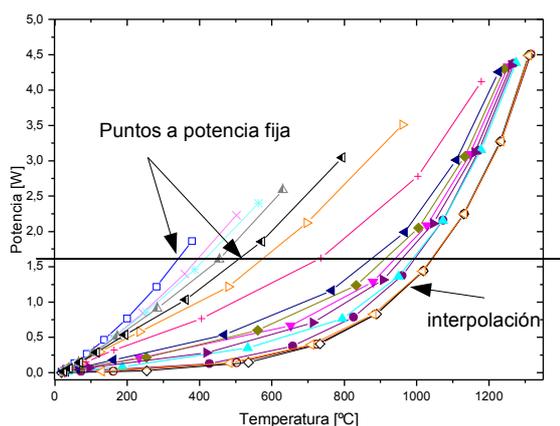
Parámetros	Valores
$B_0 [^{\circ}\text{C}]$	$25 \pm 6$
$B_1$	$0,03 \pm 0,04$
$B_2 [^{\circ}\text{C}^{-2}]$	$(1,30 \pm 0,9) \times 10^{-4}$
$B_3 [^{\circ}\text{C}^{-3}]$	$(-1,05 \pm 0,8) \times 10^{-7}$
$B_4 [^{\circ}\text{C}^{-4}]$	$(5 \pm 2) \times 10^{-11}$
$R^2$	0,99981

**Tabla 2** Parámetros del ajuste realizados.

Esta relación fue usada para inferir que el termino radiativo y el conductivo por los soportes va como un polinomio de grado 5.

### 2. Relación entre temperatura y presión a potencia fija.

Para relacionar la temperatura del filamento y la presión en la cámara se interpolaron las curvas, se trazo una horizontal al valor de potencia que se quería estudiar y se tomaron los puntos intersección.



**Figuran 9** Determinación de la relación temperatura vs presión.

## Referencias

- [1] Franck P. Incropera, David P Dewitt. *Fundamentos de transferencia de calor*. School of Mechanical Engineering (4ta ed.). Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- [2] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/kinetic/menfre.html>.
- [3] Charla con Julio Gimpel, profesor de la cátedra de experimental II, Instituto Balseiro.
- [4] Charla con Dario Fabián Delmastro, profesor de la cátedra de Transferencia de Calor y Masa, Instituto Balseiro.