

Efecto Leidenfrost

D. Peluso y F. Yulita

Departamento de Física, FCEyN, UBA, CABA, Argentina

9 de mayo, 2019

1. Resumen

Se sumergieron muestras metálicas cilíndricas en nitrógeno líquido y se logró medir la temperatura y el calor transferido por unidad de tiempo entre ellos con el objetivo de comparar sus curvas en base a las diferencias físicas que se presentaban entre ellas. Se midió y explicó el efecto Leidenfrost y se determinó el punto de colapso la capa gaseosa aislante del efecto Leidenfrost.

2. Introducción

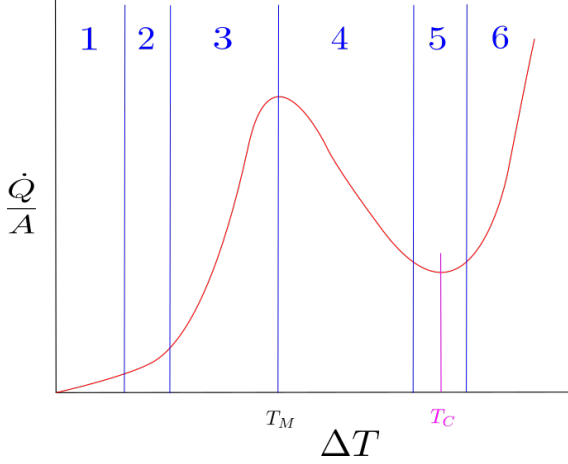


Figura 1: Gráfico cualitativo del calor intercambiado por unidad de tiempo entre ambos cuerpos en función de la diferencia de temperatura.

El efecto Leidenfrost [1] es un fenómeno que ocurre cuando un líquido entra en contacto con un material cuya temperatura es significativamente mayor que su temperatura de saturación. El líquido se evapora y forma una capa gaseosa alrededor del material que aísla el contacto entre ambos. Esto logra disminuir la transferencia de calor por unidad de tiempo y en consecuencia el proceso se demora más tiempo en llegar al equilibrio térmico.

En la **Figura 1** se puede ver un gráfico cualitativo de la transferencia de calor por unidad de tiempo y área entre ambos cuerpos en función de la diferencia de temperatura del cuerpo caliente y la temperatura de saturación del líquido frío. En rojo se representa a la función mencionada y en azul se separaron 6 distintas etapas en la que el efecto Leidenfrost se desarrolla.

En la primera etapa la temperatura de ambos cuerpos es similar y por lo tanto el calor que intercambian está dado por un proceso de

convección natural. La segunda etapa se conoce como la *etapa de evaporación de núcleo* donde se empiezan a generar burbujas que colapsan antes de llegar a la superficie.

En la tercera etapa las burbujas logran liberar el calor atrapado hacia la superficie. Esto sucede cada vez con mayor frecuencia hasta que se llega a la temperatura donde se ve que hay un máximo local que llamamos T_M . En la cuarta etapa las burbujas empiezan a unirse y logran formar la capa de vapor antes mencionada que aísla a ambos cuerpos.

En la quinta etapa la potencia que transfieren se mantiene relativamente constante ya que la capa de vapor se vuelve estable. A la temperatura del mínimo local que se marca en púrpura en el gráfico la llamamos T_C y a este punto se lo llama *punto de Leidenfrost*. En la sexta etapa la transferencia de calor aumenta debido a que aumenta la transferencia de energía mediante radiación a través de la capa de vapor.

El objetivo de este experimento es medir gráficos como el anterior para muestras cilíndricas de distintas masas, tamaños, materiales y texturas sumergidos en nitrógeno líquido y compararlos entre sí para ver como el gráfico se ve afectado por sus cualidades físicas. También se graficará la caída de temperatura de las muestras para compararlas en base a las propiedades ya mencionadas.

Para medir la transferencia de calor por unidad de tiempo y área se usó la fórmula de calor:

$$Q = nC_p T,$$

donde Q es el calor transferido, n el número de moles, C_p la capacidad calorífica isobárica y T la diferencia de temperatura de la muestra con respecto al nitrógeno. Por lo tanto, asumiendo que la capacidad calorífica isobárica no varía significativamente, se puede derivar respecto del tiempo y dividir por el área A de la muestra para obtener:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{n}{A} C_p \frac{dT}{dt}. \quad (1)$$

Para la capacidad calorífica isobárica se utilizaron algunas aproximaciones. Primero se usó que:

$$C_p = C_v + \frac{\beta^2}{\kappa} VT$$

donde C_v es la capacidad calorífica isocórica, β el coeficiente isobárico de expansión térmica y κ la compresibilidad isotérmica. En el rango de temperaturas utilizado (entre 77 K y 300 K) se puede despreciar al segundo término. Además, la capacidad calorífica isocórica se puede escribir como:

$$C_v = C_l + \gamma T,$$

donde C_l es la contribución de fonones del material y γT es una contribución electrónica. En el rango de temperaturas usado se puede despreciar el segundo término. Usando el modelo de Einstein para sólidos se puede usar que:

$$C_l = 3R \left(\frac{\theta_E}{T} \right)^2 \frac{e^{\frac{\theta_D}{T}}}{\left(1 - e^{\frac{\theta_D}{T}} \right)^2} \quad (2)$$

donde R es la constante de gases, θ_D es la temperatura característica de Debye y θ_E es la temperatura característica de Einstein. Para este último término se usó la igualdad:

$$\theta_E = \theta_D \left(a + b e^{-\frac{cT}{\theta_D}} \right) \quad (3)$$

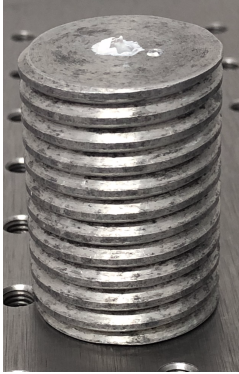


Figura 2: Muestra cilíndrica de aluminio con superficie rugosa, $Al2$.

donde $a = 0,77$, $b = 0,26$, $c = 9,17$ y $\theta_D = 315K$ para el cobre y $\theta_D = 433K$ para el aluminio [2]. Usando las **Ecuaciones 1, 2 y 3** se lograron hacer los gráficos deseados. Se midieron los moles y las áreas de las muestras y para cada una se midieron las temperaturas mientras estaban sumergidas en el nitrógeno.

3. Desarrollo experimental

Se utilizaron cuatro muestras distintas, dos de cobre y dos de aluminio. Las de cobre tenían distintas masas y tamaño, a la pequeña se la llamó $Cu1$ y a la grande $Cu2$. Las muestras de aluminio que se usaron eran de masa y dimensiones similares entre sí pero una, que se llamó $Al1$, era de superficie lisa mientras que la otra, $Al2$, era de superficie rugosa como un tornillo. En la **Figura 2** se puede ver una foto de la muestra $Al2$. Usando que la masa molar del cobre es de 63.54 g y la de aluminio es 26.98 g se calculó la cantidad de moles que tenía cada muestra y, usando las dimensiones de cada cilindro, se calculó el área de su superficie. En la **Tabla 1** se pueden ver los datos de las muestras usadas. Para $Al2$ se aproximó su superficie por la de un cilindro liso con el diámetro y altura medidos.

	$Cu1$	$Cu2$	$Al1$	$Al2$
Altura (mm)	$49,2 \pm 0,1$	$93,5 \pm 0,1$	$44,94 \pm 0,01$	$45,03 \pm 0,01$
Diámetro (mm)	$22,1 \pm 0,1$	$37,9 \pm 0,1$	$31,70 \pm 0,01$	$31,22 \pm 0,01$
Masa (g)	$165,8 \pm 0,1$	$941,0 \pm 0,1$	$99,12 \pm 0,01$	$93,45 \pm 0,01$
Área (mm ²)	4180 ± 20	13390 ± 40	6053 ± 3	5948 ± 3
Moles	$2,609 \pm 0,001$	$14,808 \pm 0,001$	$3,6738 \pm 0,0001$	$3,4637 \pm 0,0001$

Tabla 1: Cantidades medidas para cada muestra cilíndrica.

Para medir temperaturas se utilizó una resistencia de platino Pt100 conectada a cuatro puntas a un multímetro Agilent 34401A que se conectó a una computadora para extraer y analizar los datos. En la **Figura 3** se puede ver el montaje experimental para una muestra de cobre. El montaje fue el mismo para el resto de las muestras. La resistencia fue calibrada utilizando tres temperaturas conocidas: temperatura ambiente, la temperatura de fusión del agua y la temperatura de saturación del nitrógeno líquido [Anexo 1].

Se utilizó un contenedor de plástico con un pegamento asilante y un contenedor más pequeño adentro que contenía al nitrógeno. Allí se sumergieron las muestras y se midió la temperatura en función del tiempo con la resistencia de platino. Esta resistencia se introducía en un agujero en las muestras con grasa siliconada para mejorar el contacto entre la resistencia y la muestra. Esto demostró ser muy importante al tomar las mediciones. En la **Figura 2** puede verse la grasa (color blanca) que sobresale del agujero en la muestra.

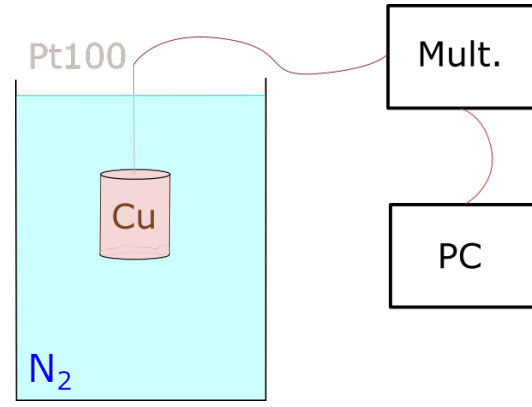


Figura 3: Montaje experimental.

4. Resultados y discusión

4.1. Temperaturas

Se obtuvieron las siguientes temperaturas en función del tiempo para repetidas mediciones de la muestra *Cu1* (**Figura 4**), para las muestras *Cu1* y *Cu2* (**Figura 5**), y para las muestras *Al1* y *Al2* (**Figura 6**). El error en las temperaturas corresponde de su propagación de la calibración de la Pt100.

Para los dos últimos casos se hallaron los tiempos críticos, denominados de ahora en más t_c . Estos tiempos corresponden a la transición de la etapa 4 a la etapa 3 donde, ya colapsada la capa gaseosa, se produce un máximo local en la transmisión de calor.

Con los t_c se halló también para cada caso la diferencia de temperatura $\Delta T = T_M$ entre la muestra y el fluido que corresponde a la transición de etapas antes mencionada. El error en los tiempos corresponde a la mínima cantidad distinguible por la resolución de las mediciones.

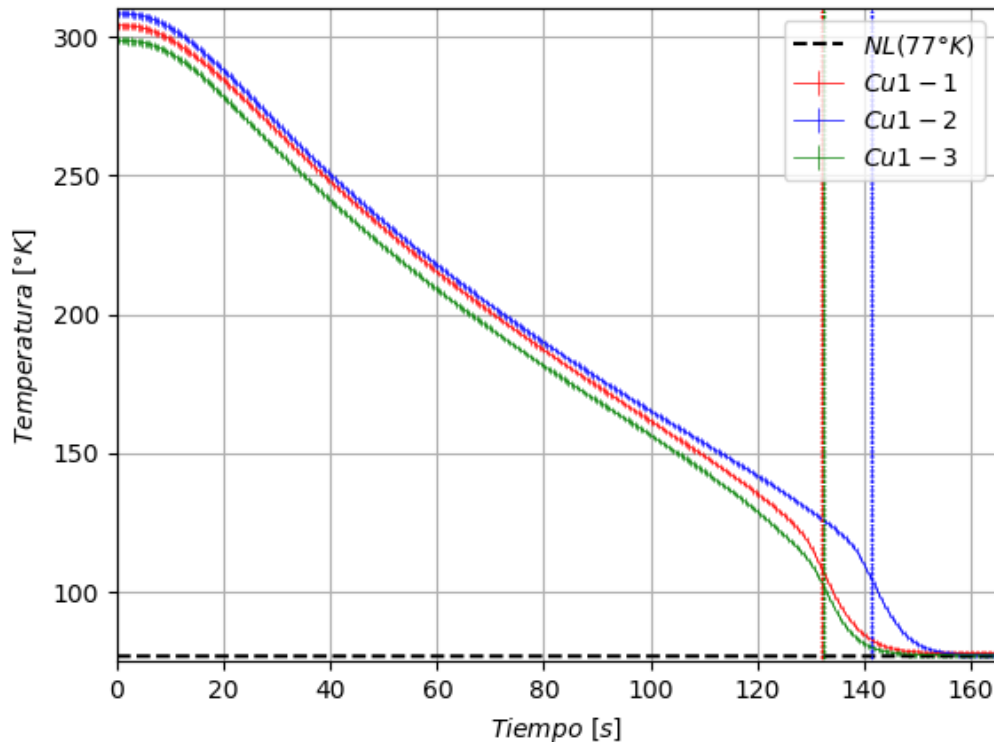


Figura 4: Temperatura en función del tiempo para tres mediciones de la muestra *Cu1*

Los t_c correspondientes para cada medición son: $t_{c1-1} = (132,2 \pm 0,5)s$, $t_{c1-2} = (141,4 \pm 0,5)s$ y $t_{c1-3} = (132,5 \pm 0,5)s$. Es notable el distanciamiento de la *medición 2* con respecto a las otras dos, por más de tratarse del mismo cilindro y la misma diferencia de temperatura inicial con respecto a la *medición 1* que la *medición 3* ($\sim 4^\circ K$).

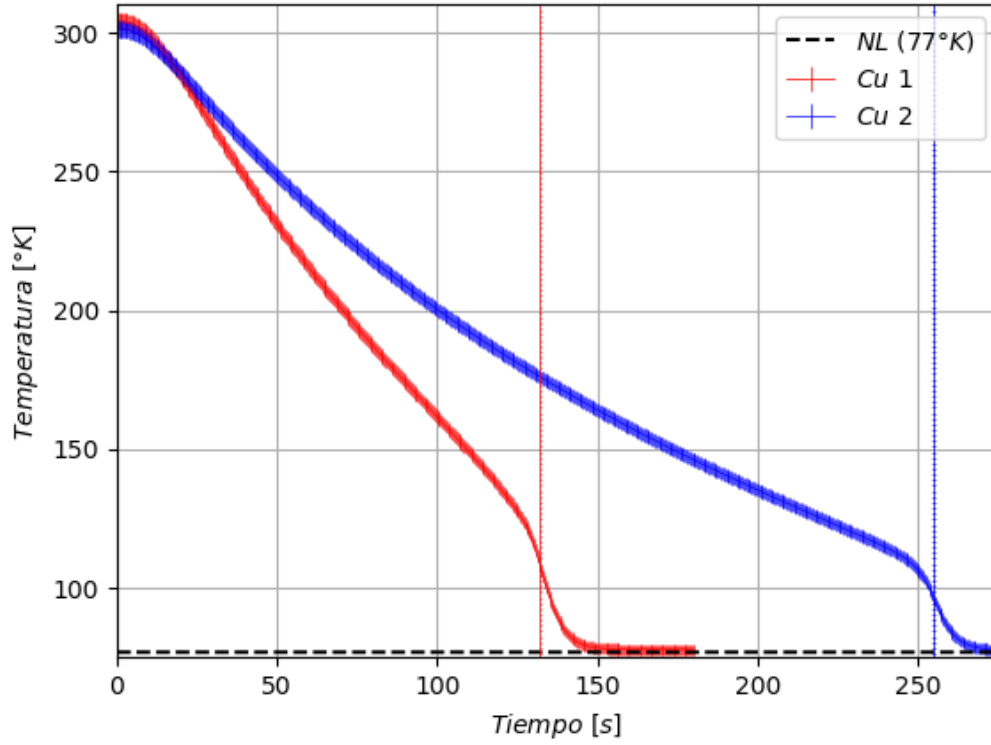


Figura 5: Comparación de temperaturas entre las muestras *Cu1* y *Cu2*

El tiempo crítico para la muestra más masiva resultó ser de $t_{c2} = (255,1 \pm 0,5)s$. Nótese como este tiempo es significativamente mayor al de *Cu1* lo cual corresponde con la significativa diferencia de masa. Por eso, se buscó hallar una constante de proporcionalidad entre los tiempos críticos y las diferencias físicas relevantes entre ambas muestras, masa y superficie.

$$\alpha_{m1} = \frac{t_{c1-1}}{m1} ; \alpha_{m2} = \frac{t_{c2}}{m2}$$

$$\alpha_{A1} = \frac{t_{c1-1}}{A1} ; \alpha_{A2} = \frac{t_{c2}}{A2}$$

Se obtuvieron:

$$\alpha_{m1} = (0,797 \pm 0,003) \frac{s}{g} ; \alpha_{m2} = (0,2711 \pm 0,0005) \frac{s}{g}$$

$$\alpha_{A1} = (31600 \pm 200) \frac{s}{m^2} ; \alpha_{A2} = (19050 \pm 70) \frac{s}{m^2}$$

Como los intervalos de los posibles valores para las constantes no se intersecan no se puede asumir este tipo de relación directa. Ambas variables (masa y área de superficie) deben contribuir al tiempo crítico con otro tipo de relación, pero sus efectos son apreciables como puede verse en la **Figura 5**.

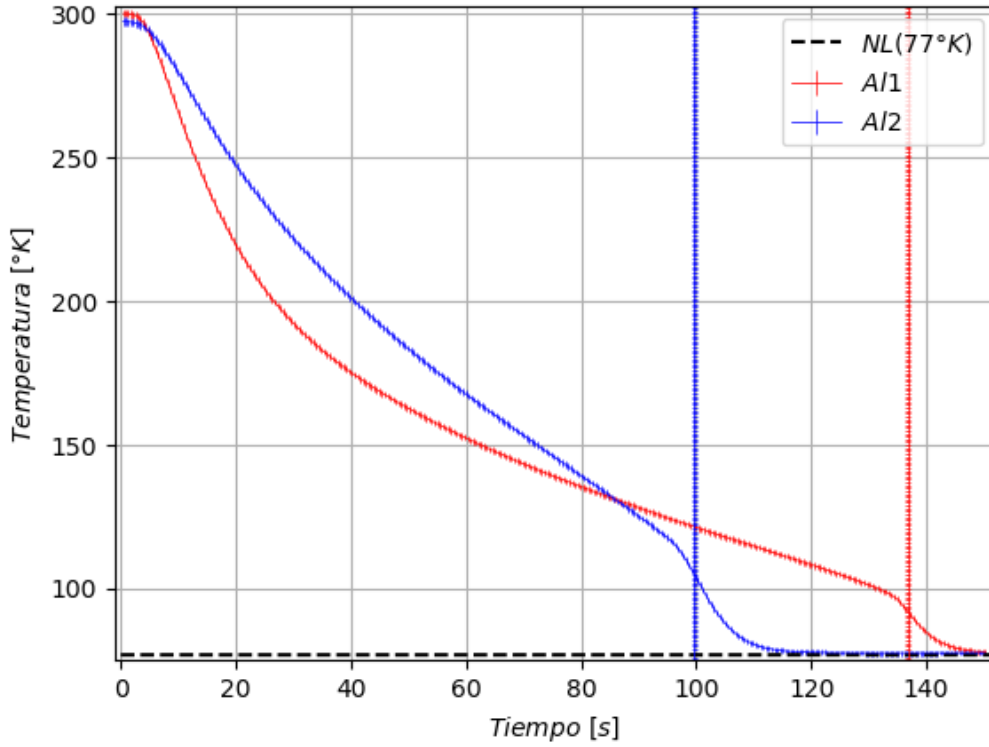


Figura 6: Comparación de temperaturas entre las muestras $A/1$ y $A/2$

Los tiempos críticos para las muestras lisa y rugosa resultaron ser de $t_{A/1} = (136,8 \pm 0,5)s$ y de $t_{A/2} = (99,7 \pm 0,5)s$. Es interesante destacar la diferencia entre estos tiempos considerando que las muestras poseen masas muy similares. Se concluyó que la superficie rugosa contribuye a la inestabilidad de la capa gaseosa alrededor de la muestra, causando así su colapso temprano con respecto a la muestra lisa.

También se observó que en el intervalo de tiempo anterior al colapso la pendiente correspondiente a la muestra lisa es mucho más pronunciada. Se conjeturó que la forma rugosa obstaculiza la ascensión de líquido más caliente hacia la superficie, demorando su reemplazo por el nitrógeno que todavía no entró en contacto con la muestra.

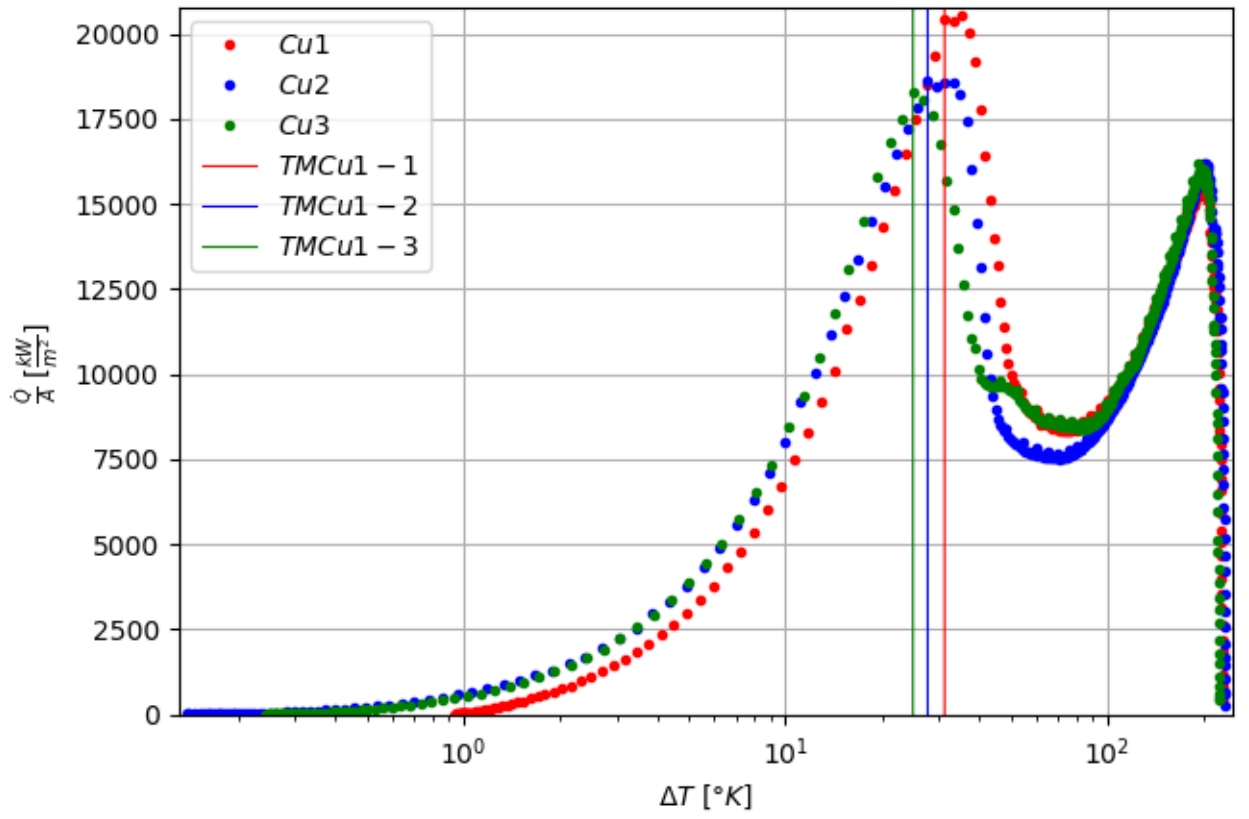
4.2. Transferencia de calor y curvas de Leidenfrost

Se obtuvieron las siguientes curvas de calor transferido en función de la diferencia de temperatura entre la muestra y el nitrógeno líquido. Para tres mediciones de la muestra $Cu1$ (**Figura 7 (a)**), para las muestras $Cu1$ y $Cu2$ (**Figura 7 (b)**) y para las muestras $A/1$, $A/2$ (**Figura 8 (a)**) y para la muestra $Cu1$ (**Figura 8 (b)**) con tres diferentes aislaciones.

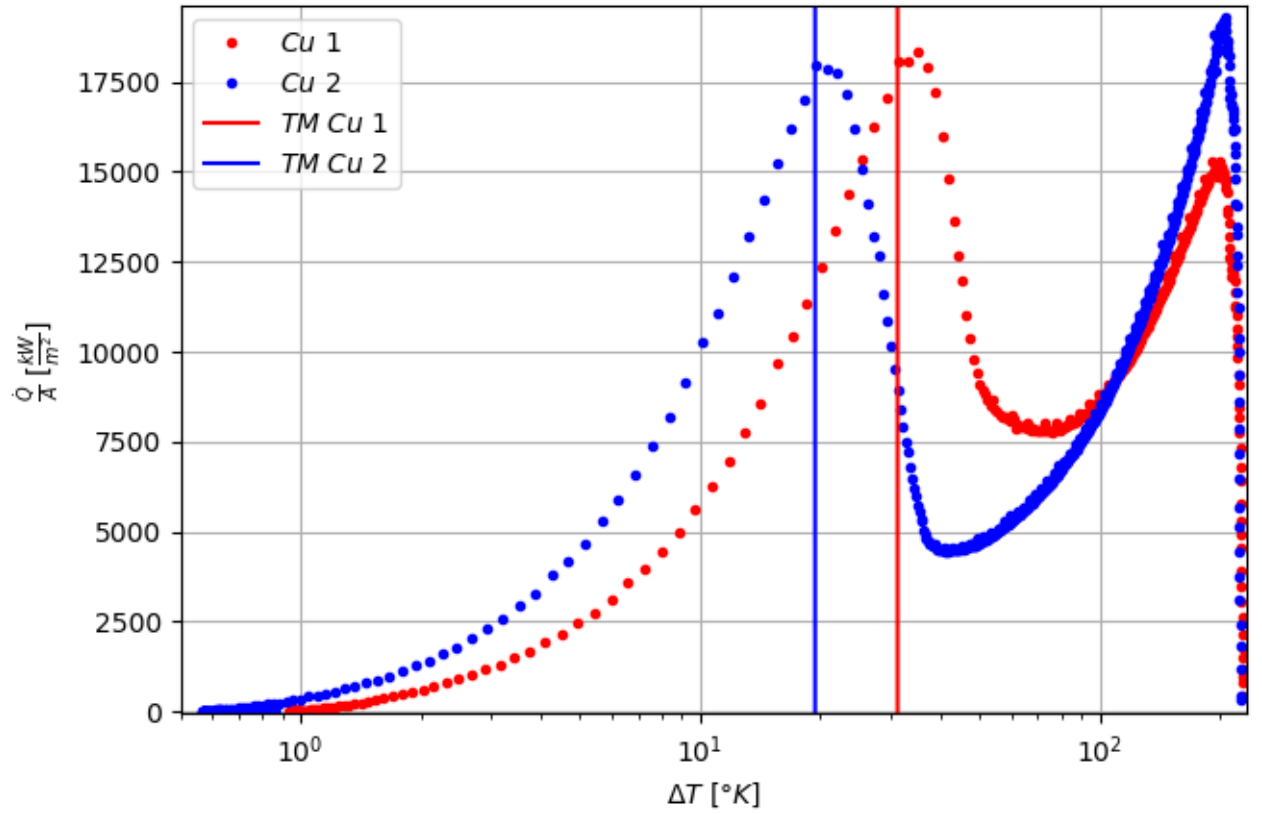
Tras la propagación de la **Ecuación 1** considerando las aproximaciones discutidas en la introducción, se observó que los errores resultan despreciables para la magnitud de los datos, cuatro órdenes de magnitud por debajo.

Se listan junto con las figuras las respectivas T_M con respecto a la temperatura del nitrógeno líquido.

De la **Figura 8 (a)** pudo analizarse la repetitividad del experimento. Se comprobó que en el máximo alrededor de T_M se encuentra la mayor desviación de las distintas mediciones. Siendo esta desviación a lo sumo del $\sim 8\%$ del promedio entre las tres mediciones para cada temperatura.

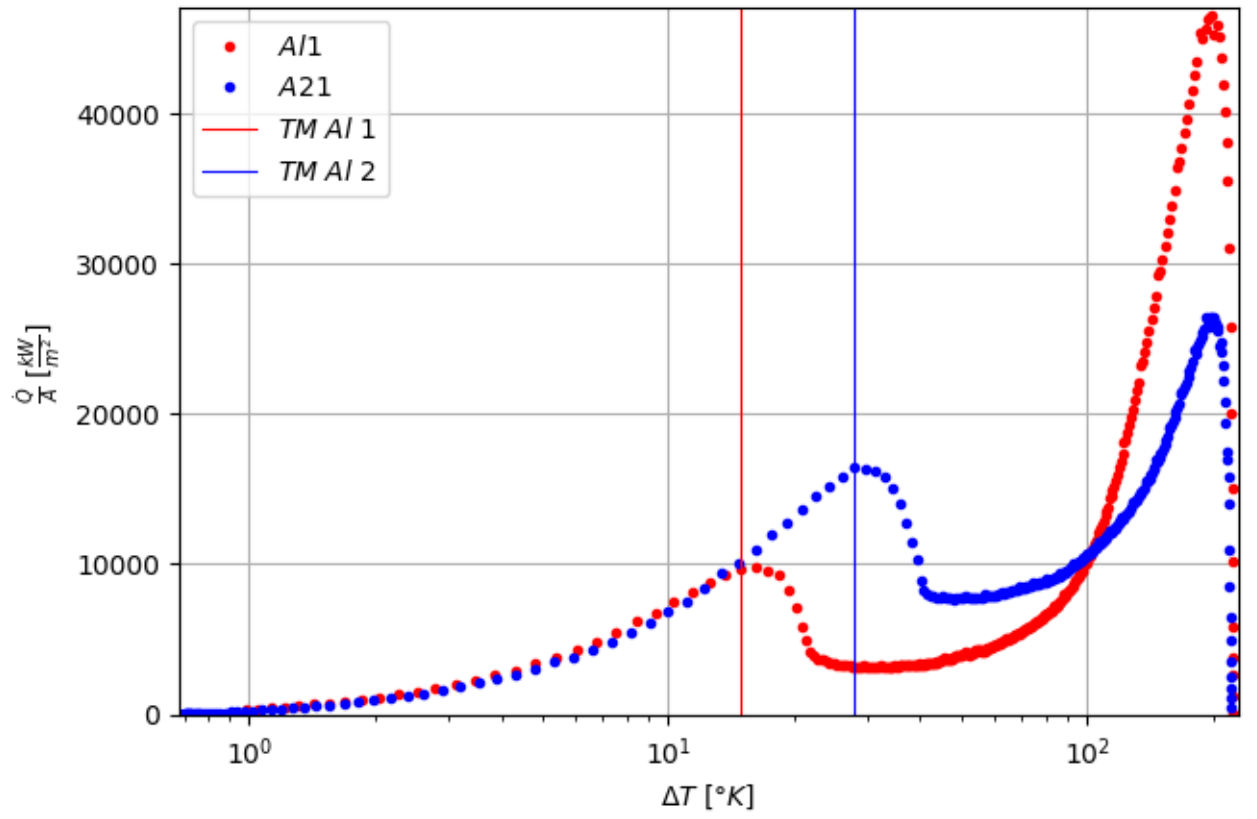


(a) Transferencia de Calor para $Cu1$.

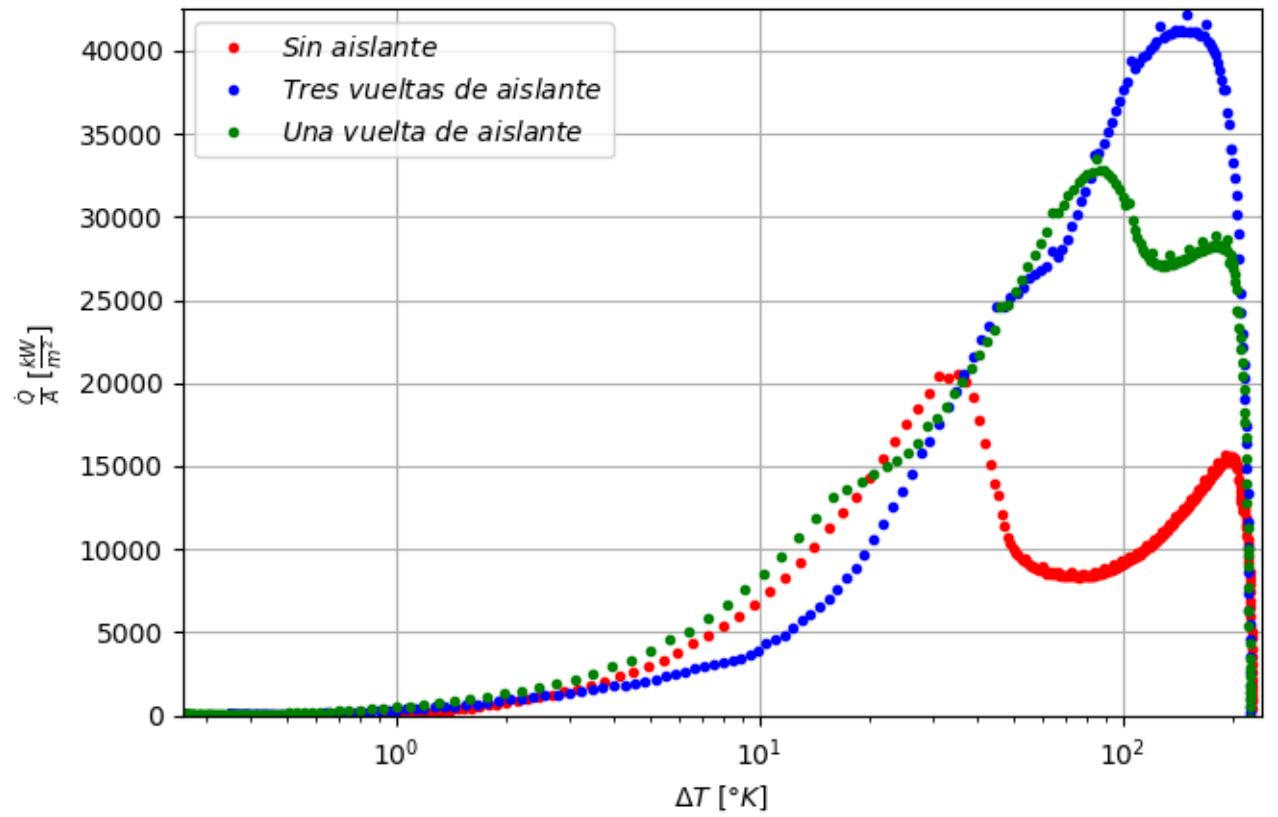


(b) Comparación de transferencia de calor para $Cu1$ y $Cu2$.

Figura 7: Transferencia de calor. $TM_{Cu1-1} = 31,2^{\circ}K$, $TM_{Cu1-2} = 27,6^{\circ}K$, $TM_{Cu1-3} = 24,9^{\circ}K$, $TM_{Cu2} = 19,4^{\circ}K$



(a) Transferencia de calor para Al1 y Al2.



(b) Comparación de transferencia de calor para Cu1 con distintos grados de aislación

Figura 8: Transferencia de calor. $TM_{Al1} = 15,0^{\circ}K$, $TM_{Al2} = 27,8$.

Mediante la **Figura 8 (b)** pudo observarse que el efecto Leidenfrost puede ser contrarrestado aplicando un aislante externo a las muestras a sumergir en el nitrógeno líquido. Quedando el punto Leidenfrost cada vez más cercano a la temperatura inicial hasta que deja de producirse ese mínimo en la transferencia de calor.

Esto optimiza el enfriamiento de la muestra. En la **Figura 9** se observan los tiempos de enfriamiento.

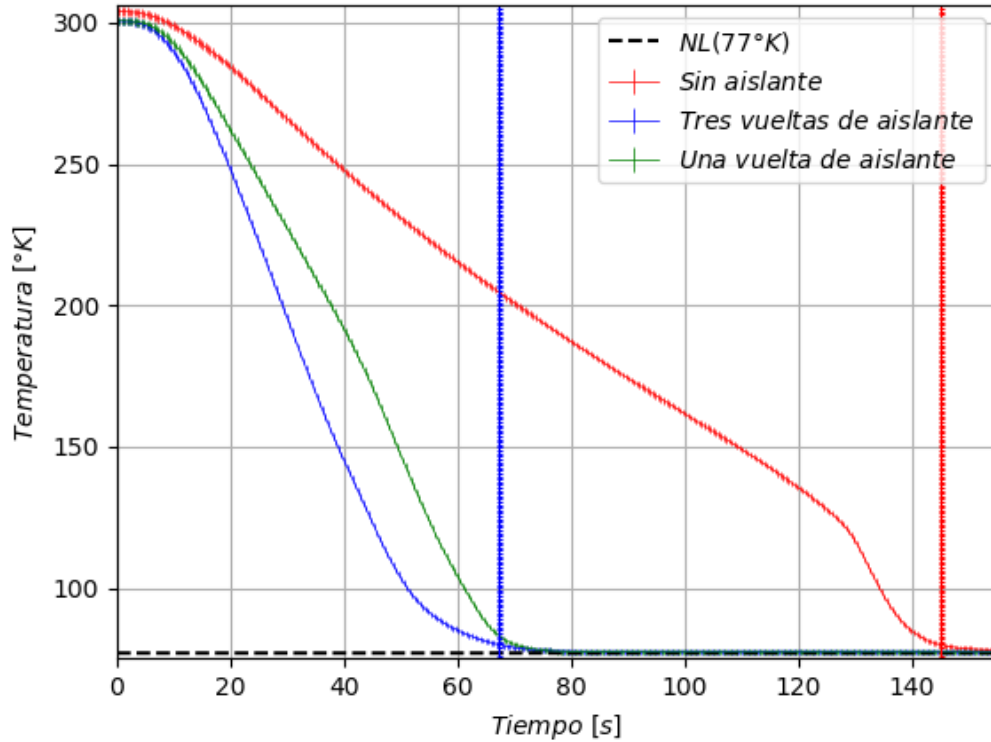


Figura 9: Temperatura en función del tiempo para *Cu 1* con distintas aislaciones.

Se obtuvo la diferencia de tiempo entre enfriar la muestra *Cu1* sin aislante y con tres vueltas de aislante: $\Delta t = (77,8 \pm 0,5)s$. Esta diferencia se debe a que debido a que el aislante disminuye la transferencia de calor en el momento que se sumerge la muestra la capa de vapor que la rodea que se genera es mucho más fina, y por lo tanto, aísla menos a la muestra.

5. Conclusión

Se concluyó que, para muestras de las dimensiones y masas analizadas durante la experiencia, existe un balance entre los factores que afectan a la entrega de calor de la misma y ninguno domina sobre los otros. Entre estos factores importan tanto la masa como el área y la forma de la superficie de contacto, y todos ellos afectan finalmente al tiempo que lleva enfriar la muestra.

Para una mayor masa el tiempo requerido es mayor. Y para una superficie lisa el tiempo de enfriamiento es mayor en comparación a una superficie rugosa.

Además el efecto Leidenfrost puede reducirse mediante la aplicación de una capa aislante a la muestra que se quiere enfriar, logrando así que el proceso tarde menos tiempo.

Referencias

- [1] T. W. Listerman, T. A. Boshinski, and L. F. Knese, *Cooling by immersion in liquid nitrogen*, pp. 554–558. American Journal of Physics, 54 ed., 1986.
- [2] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, p. 116. John Wiley Sons, Inc., 8 ed., 2004.

6. Anexo

Calibración de la Pt100. Se utilizó un polinomio de grado dos con los siguientes coeficientes.

$$T = aR^2 + bR + c ; a = 0,006 ; b = 1,74 ; c = 39,07$$